

**В. Р. Мадьяров, В. В. Тульев,
И. И. Наркевич**

ФИЗИКА

**Лабораторный практикум
для студентов химико-технологических
и инженерно-технических специальностей**

В 3-х частях

Часть 2. Электричество и магнетизм

Минск БГТУ 2007

Учреждение образования
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

**В. Р. Мадьяров, В. В. Тульев,
И. И. Наркевич**

ФИЗИКА

**Лабораторный практикум
для студентов химико-технологических
и инженерно-технических специальностей**

В 3-х частях

Часть 2. Электричество и магнетизм

Минск 2007

УДК 53(076.5)
ББК 22.3я7
М 34

Рассмотрен и рекомендован редакционно-издательским советом
университета

Рецензенты:

заведующий кафедрой технической физики БНТУ
кандидат физико-математических наук *Е. Е. Трофименко*;
профессор кафедры физики БГУИР
доктор физико-математических наук *Н. Т. Квасов*

Мадьяров, В. Р.

М 34 Физика. В 3 ч. Ч. 2. Электричество и магнетизм : лаб. практикум для студентов химико-технологических и инженерно-технических специальностей / В. Р. Мадьяров, В. В. Тульев, И. И. Наркевич. – Минск : БГТУ, 2007. – 86 с.

ISBN 978-985-434-748-6

Первая часть лабораторного практикума «Физика» издана в 2006 году. Вторая часть является продолжением цикла лабораторных работ по разделам физики.

В пособии приводятся вопросы для теоретической подготовки, кратко изложен методический материал, необходимый для выполнения лабораторных работ по разделам «Электричество» и «Магнетизм» студентами химико-технологических и инженерно-технических специальностей.

УДК 53 (076.5)
ББК 22.3я7

ISBN 978-985-434-748-6 (Ч. 2) © УО «Белорусский государственный
ISBN 985-434-643-9 технологический университет», 2007

ПРЕДИСЛОВИЕ

По разделам «Электричество» и «Магнетизм» необходимо выполнить 19 лабораторных работ. По каждой из них студент должен оформить в отдельной тетради отчет, который должен иметь следующую структуру.

Номер, название и цель работы.

Теоретическое введение (раздел должен содержать ответы на поставленные в лабораторной работе вопросы с использованием формулировок законов, определений основных физических величин и соотношений между ними, а также рисунков, графиков и схем с пояснениями к ним);

Описание установки и метода измерений (общий вид или схематический рисунок установки, вывод расчетной формулы измеряемой величины, а также формулы для определения погрешностей косвенных измерений);

Результаты измерений и их обработки (таблицы с заданными, измеренными и вычисленными параметрами и величинами и их погрешностями, а также численные расчеты измеряемых величин с короткими пояснениями и графики полученных зависимостей);

Выводы, дата сдачи работы, оценка и подпись преподавателя.

Процесс выполнения лабораторной работы делится на три этапа.

Первый этап. Самоподготовка. Студент, используя материал конспекта лекций и учебников [1–5], письменно отвечает на поставленные в первом разделе вопросы, т. е. изучает необходимый теоретический материал к работе, далее знакомится со схемой, устройством и принципом работы установки, а также последовательностью практического выполнения работы. На лабораторных занятиях студент предъявляет преподавателю два первых раздела отчета и таблицу для занесения и обработки результатов измерений из третьего раздела, что является необходимым условием для решения вопроса о допуске к практическим измерениям.

Если студент не выполнил работу на первом этапе, то он не допускается ко второму этапу до тех пор, пока она не будет выполнена.

Второй этап. Выполнение измерений. Студент проводит измерения и заносит их результаты в таблицу (с обязательным указанием единиц измерения). Затем он выполняет *контрольный расчет*, который должен подтвердить правильность измерений, показывает его преподавателю и уточняет методику и порядок расчета погрешностей.

Третий этап. Обработка результатов измерений и сдача работы. Студент заканчивает работу над третьим и четвертым разделами отчета. После собеседования преподаватель выставляет оценку в виде рейтингового балла за качество усвоения материала и своевременность выполнения всех этапов.

Срок сдачи работы – следующие лабораторные занятия.

ЭЛЕКТРИЧЕСТВО

Лабораторная работа № 31

ИЗМЕРЕНИЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ ТВЕРДЫХ ДИЭЛЕКТРИКОВ

Цель работы: ознакомиться с методикой измерения диэлектрической проницаемости ϵ твердых диэлектриков методом *контурного резонанса*; измерить диэлектрическую проницаемость ϵ образцов с помощью куметра.

1. Теоретическое введение

Пользуясь конспектом и рекомендуемой литературой, изучите теоретический материал темы и изложите письменно ответы на следующие вопросы (изложение должно содержать текст, формулы, рисунки).

1. Классификация диэлектриков (по составу и строению вещества, а также по агрегатному состоянию) и их характеристика.
2. Явление поляризации диэлектриков и поляризуемость их микрочастиц (атомов, молекул и т. д.).
3. Вектор поляризации или поляризованность диэлектриков. Диэлектрическая восприимчивость и проницаемость диэлектриков.
4. Точка Кюри для фазового перехода сегнетоэлектрик – полярный диэлектрик.
5. Механизмы поляризации диэлектриков, включая сегнетоэлектрики.
6. Конденсаторы и их емкость. Расчет емкости батарей конденсаторов при их последовательном и параллельном соединении.

2. Описание установки и метода измерений

В основу метода измерений диэлектрической проницаемости ϵ положено сопоставление емкостей двух плоскопараллельных конденсаторов с одинаковыми геометрическими размерами, один из которых заполнен исследуемым диэлектриком. Емкость C воздушного ($\epsilon_v = 1,0006$) конденсатора в ϵ раз меньше, чем емкость такого же конденсатора, пространство между обкладками которого заполнено диэлектриком с проницаемостью ϵ . Измеряя емкость конденсатора с диэлектриком и без него, можно определить величину ϵ . Как правило, различие емкостей конденсаторов с диэлектриком и без диэлектрика не-

большое (несколько пикофард). Поэтому в работе используется прибор (*куметр*), позволяющий измерять емкость с высокой точностью, схема которого приведена на рис. 1.

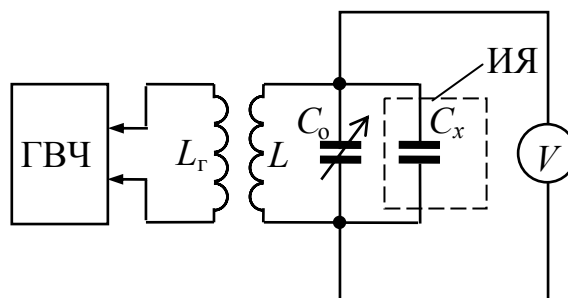


Рис. 1

В основу измерения емкости куметром положен *резонансный метод*. Измерительная ячейка (ИЯ) с емкостью C_x подключается параллельно встроенному в куметр образцовому конденсатору переменной емкости C_0 . Вместе с катушкой индуктивностью L они образуют колебательный контур. Возбуждение колебаний в контуре обеспечивается через индуктивную связь с катушкой L_{Γ} , подключенной к генератору тока высокой частоты (ГВЧ). Колебательный контур куметра обладает очень малым активным сопротивлением ($R \approx 0$). Поэтому при частоте генератора, близкой к собственной частоте ω_0 контура, возникает *резонанс напряжения*:

$$\omega_p \approx \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} = \frac{1}{\sqrt{L(C_0 + C_x)}}. \quad (1)$$

В резонансном режиме колебаний напряжение U на конденсаторах C_0 и C_x , измеряемое ламповым вольтметром V куметра, имеет максимальное значение. Из соотношения (1) следует, что если частота ω_p генератора фиксирована, то при неизменной индуктивности L резонанс в контуре можно получить путем изменения емкости образцового конденсатора C_0 . Очевидно, что резонанс на заданной частоте ω_0 будет наблюдаться при одной и той же емкости контура $C = C_0 + C_x$, поэтому для двух измеряемых емкостей C_{x1} и C_{x2} должно выполняться соотношение

$$C_{01} + C_{x1} = C_{02} + C_{x2}, \Rightarrow C_{01} - C_{02} = C_{x2} - C_{x1}, \quad (2)$$

где C_{01} и C_{02} – значения переменной емкости C_0 при резонансе, которые считываются по шкале куметра в двух опытах.

Конденсатор C_x состоит из двух параллельных обкладок, выполненных в виде дисков с закругленными краями. Он помещен в металлический корпус, который уменьшает влияние на измеряемую емкость внешних тел, т. е. он является *электрическим экраном*. Для конденсатора с воздушным зазором между обкладками емкость

$C_{x1} = C_{пл} + C_{кр}$, где $C_{пл}$ и $C_{кр}$ – емкости плоской и краевой частей обкладок соответственно. Если плоскую часть этого же конденсатора заполнить диэлектриком, то $C_{x2} = \varepsilon C_{пл} + C_{кр}$. Подставив C_{x1} и C_{x2} в равенство (2), получим

$$C_{o1} + C_{пл} = C_{o2} + \varepsilon C_{пл} \Rightarrow \varepsilon = 1 + \frac{(C_1 - C_2)d}{\varepsilon_0 S}. \quad (3)$$

Здесь учтено, что для плоского воздушного конденсатора емкость $C_{пл} = \varepsilon_0 S/d$, где S – площадь диска диаметром D ($D = 5$ см).

3. Порядок выполнения работы и обработка результатов измерений

1. Подготовьте табл. 1 для внесения результатов измерений.

Таблица 1

№ образца	Материал	ω ,	l_1 ,	l_2 ,	d ,	C_{o1} ,	C_{o2} ,	ε ,

2. По инструкции в приложении к установке ознакомьтесь с назначением элементов управления на передней панели куметра, порядком его включения и проведения измерений.

3. Согласно варианту (номеру звена) определите по таблице приложения номера образцов, катушки индуктивности L и частоту ω генератора (занесите эту информацию в таблицу).

4. Вставьте катушку в гнездо куметра и выставьте по его шкале частоту ω в диапазоне, указанном на корпусе катушки. С разрешения преподавателя или лаборанта подключите установку к сети.

5. Осторожно вращая головку микрометрического винта до соприкосновения верхнего электрода с нижним в указанном направлении, опустите верхний подвижный электрод (обкладку конденсатора). Вращение прекратите в момент проворачивания трещотки. Занесите в таблицу показание l_1 микрометра.

6. Вращая головку винта, поднимите верхний электрод и поместите между электродами образец, осторожно зажмите его до проворачивания трещотки и отметьте l_2 . Определите толщину образца ($d = l_2 - l_1$).

7. По инструкции куметра настройте контур в резонанс по максимальному отклонению стрелки Q -вольтметра и занесите отсчет емкости C_{o2} в таблицу.

8. Удалите образец из ячейки и установите зазор между элект-

тродами, равный толщине образца d . Опять настройте контур в резонанс и определите отсчет C_{01} .

9. Повторите измерения по п. 6–8 для двух других образцов.

10. По формуле (3) для каждого образца рассчитайте ε и сравните их со справочными значениями.

Лабораторная работа № 32

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ ЖИДКИХ ДИЭЛЕКТРИКОВ

Цель работы: ознакомиться с методикой измерения диэлектрической проницаемости ε жидкого диэлектрика *сравнительным методом*; измерить диэлектрическую проницаемость ε образцов с помощью *куметра*.

1. Теоретическое введение

Пользуясь конспектом и рекомендуемой литературой, изучите теоретический материал темы и изложите письменно ответы на следующие вопросы (изложение должно содержать текст, формулы, рисунки).

1. Классификация диэлектриков (по составу и строению вещества, а также по агрегатному состоянию) и их характеристика.

2. Явление поляризации диэлектриков и поляризуемость их микрочастиц (атомов, молекул и т. д.).

3. Вектор поляризации или поляризованность диэлектриков. Диэлектрическая восприимчивость и проницаемость диэлектриков.

4. Точка Кюри для фазового перехода сегнетоэлектрик – поляризуемый диэлектрик.

5. Механизмы поляризации диэлектриков.

6. Конденсаторы и их емкость. Расчет емкости батарей конденсаторов при их последовательном и параллельном соединении.

2. Описание установки и метода измерений

В работе используется измерительная ячейка (ИЯ) (рис. 2), измерительный 1 и заземленный 2 электрода которой образуют коаксиальный цилиндрический конденсатор. Соосность цилиндров обеспечивается втулкой 3 и шайбой 4, которые изготовлены из фторопласта. Исследуемая жидкость заполняет объем межэлектродного пространства до определенного уровня, отмеченного на рис. 2 пунктирной линией. С помощью *коаксиального кабеля* (КК) ячейка подсоединяется к

измерительному прибору (куметру) (рис. 3), принцип работы которого описан в лабораторной работе № 31.

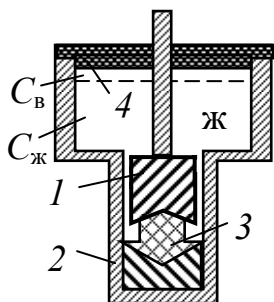


Рис. 2

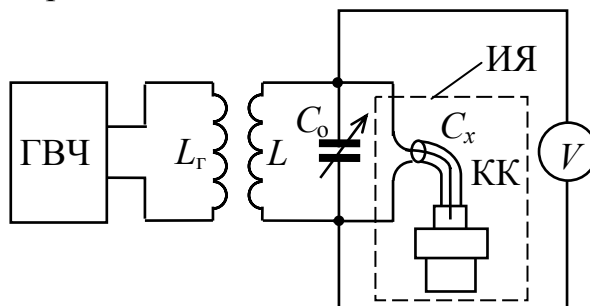


Рис. 3

Диэлектрическая проницаемость ε исследуемой жидкости определяется путем сравнения емкостей ячейки с жидкостью и без нее.

Емкость ячейки с жидкостью состоит из трех частей:

$$C_{x2} = C_{ж} + C_{в} + C_{м}, \quad (4)$$

где $C_{ж}$ – емкость части ячейки между электродами 1 и 2, которая заполнена жидкостью; $C_{в}$ – емкость части ячейки между электродами 1 и 2, которая заполнена воздухом; $C_{м}$ – емкость монтажа, которая включает в себя емкость кабеля, соединительных разъемов и входную емкость куметра.

Емкость пустой ячейки, т. е. ячейки, заполненной воздухом:

$$C_{x1} = C_{в}^* + C_{в} + C_{м}, \quad (5)$$

где $C_{в}^*$ – емкость части ячейки, объем которой равен объему, заполняемому жидкостью; в пустой ячейке эту часть заполняет воздух.

Поскольку $C_{ж} = \varepsilon C_{в}^*$, то после подстановки соотношений (4, 5) в равенство (2), получим

$$C_{o1} - C_{o2} = C_{ж} - C_{в}^* = (\varepsilon - 1)C_{в}, \quad (6)$$

где C_{o1} и C_{o2} – значения переменной емкости C_o при резонансе, которые считываются по шкале куметра в опытах с пустой и заполненной ячейкой соответственно.

Из равенства (6) следует выражение

$$C_{в} = (C_{o1} - C_{o2})/(\varepsilon - 1). \quad (7)$$

Очевидно, что аналогичное выражение получится, если ячейку заполнить калибровочной жидкостью с известным значением прони-

цаемости ε_k (в качестве такой жидкости можно использовать, например, трансформаторное масло, для которого $\varepsilon_k = 2,1$ при $t = 20^\circ\text{C}$).

$$C_B = (C_{o1} - C_{ок})/(\varepsilon_k - 1), \quad (8)$$

где $C_{ок}$ – отсчет емкости для ячейки с калибровочной жидкостью.

Приравнивая правые части выражений (7) и (8) и решая полученное уравнение, получим формулу для расчета диэлектрической проницаемости жидкости по известному значению ε_k калибровочной жидкости

$$\varepsilon = 1 + (\varepsilon_k - 1) \left(\frac{C_{o1} - C_{o2}}{C_{o1} - C_{ок}} \right). \quad (9)$$

3. Порядок выполнения работы и обработка результатов измерений

1. Подготовьте табл. 2 для занесения результатов измерений.

Таблица 2

Номер ячейки и название жидкости	C_{o1} ,	$C_{ок}$,	C_{o2} ,	ε_k и название калиб- ровочной жидкости	ε ,

2. По инструкции в приложении к установке ознакомьтесь с назначением элементов управления куметра, порядком его включения и проведения измерений. С разрешения преподавателя или лаборанта подключите установку к сети.

3. Подсоедините к куметру пустую ячейку через коаксиальный кабель. По инструкции куметра настройте контур в резонанс по максимальному отклонению стрелки Q -вольтметра и занесите отсчет емкости C_{o1} в таблицу.

4. Подсоедините к куметру ячейку с калибровочной жидкостью, проницаемость которой ε_k известна (значение ε_k указано на ячейке). Настройте куметр в резонанс и занесите отсчет $C_{ок}$ по шкале куметра в таблицу.

5. Выполните измерения емкости для ячеек с жидкостями, номера которых указаны в таблице вариантов, соответствующих номерам звеньев, значения C_{o1} для каждой жидкости занесите в таблицу.

6. По формуле (9) вычислите ε исследуемых жидкостей и сравните их со справочными значениями.

Лабораторная работа № 33

ИЗУЧЕНИЕ ПОЛЯРИЗАЦИИ СЕГНЕТОЭЛЕКТРИКОВ

Цель работы: освоить *осциллографический метод* исследования поляризации сегнетоэлектриков; изучить зависимость электрического смещения D и диэлектрической проницаемости ϵ сегнетоэлектрика от напряженности E электрического поля.

1. Теоретическое введение

Пользуясь конспектом и рекомендуемой литературой, изучите теоретический материал темы и изложите письменно ответы на следующие вопросы (изложение должно содержать текст, формулы, рисунки).

1. Классификация диэлектриков (по составу и строению вещества, а также по агрегатному состоянию) и их характеристика.
2. Явление поляризации диэлектриков и поляризуемость их микрочастиц (атомов, молекул и т. д.).
3. Вектор поляризации, или поляризованность диэлектриков. Диэлектрическая восприимчивость и проницаемость диэлектриков.
4. Механизмы поляризации диэлектриков, включая сегнетоэлектрики.
5. Зависимость поляризованности P сегнетоэлектрика и электрического смещения D от напряженности E поля. Петля гистерезиса.
6. Точка Кюри для фазового перехода сегнетоэлектрик – поляризуемый диэлектрик.
7. Конденсаторы и их емкость. Расчет емкости батарей конденсаторов при их последовательном и параллельном соединении.

2. Описание установки и метода измерений

Электрические свойства сегнетоэлектриков в переменных полях обычно изучают *осциллографическим методом*, сущность которого состоит в измерении параметров петли диэлектрического гистерезиса, наблюдаемой на экране осциллографа. Схема лабораторной установки для изучения электрических свойств сегнетоэлектриков этим методом приведена на рис. 4. Исследуемый образец в форме плоскопараллельной пластины толщиной d с нанесенными на нее токопроводящими электродами площадью S образует плоский конденсатор емкостью $C_1 = \epsilon_0 \epsilon S/d$. Этот конденсатор последовательно соединен с конденсатором емкостью C_2 , причем $C_2 \gg C_1$. На конденсаторы подается

переменное напряжение $U(t)$ через делитель напряжения, состоящий из сопротивлений R_1 и R_2 . Величину напряжения $U(t)$ можно изменять, используя переменный резистор R_3 . При прохождении переменного тока на обкладках

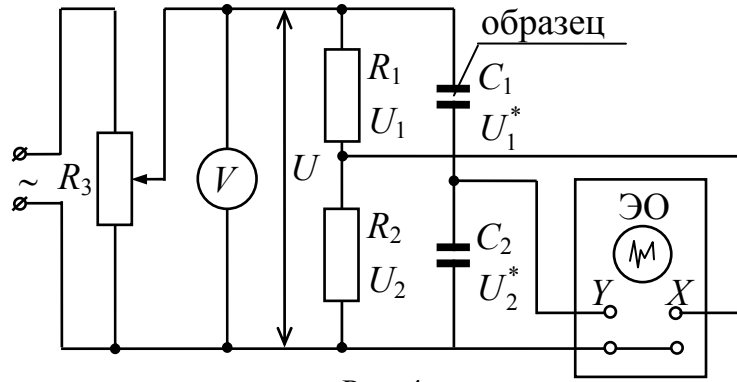


Рис. 4

последовательно соединенных конденсаторов в каждый момент времени образуются одинаковые по величине заряды ($q = CU$). Поэтому

$$C_1 U_1^*(t) = C_2 U_2^*(t) \Rightarrow U_2^*(t) = \frac{C_1}{C_2} U_1^*(t), \quad (10)$$

где U_1^* и U_2^* – напряжения на емкостях C_1 и C_2 соответственно.

Поскольку $C_1 \ll C_2$, то $U_2^* \ll U_1^*$, поэтому $U_1^* = U - U_2^*$ мало отличается от напряжения $U(t)$, т. е.

$$U(t) \cong U_1^*(t) = E(t) \cdot d, \quad (11)$$

где $E(t)$ – мгновенное значение напряженности поля в образце.

Из рис. 4 видно, что на вход X осциллографа подается напряжение

$$U_2(t) = \frac{R_2}{R_1 + R_2} U(t) \cong \frac{R_2 d}{R_1 + R_2} E(t). \quad (12)$$

Таким образом, отклонение электронного луча по горизонтали осуществляется напряжением $U_2(t)$, которое пропорционально напряженности E поля в сегнетоэлектрическом образце.

На вход Y осциллографа подается напряжение U_2^* конденсатора C_2 , которое с учетом соотношений (10, 11) и формулы для емкости плоского конденсатора ($C_1 = \epsilon_0 \epsilon S/d$) выражается через электрическое смещение $D = \epsilon_0 \epsilon E$ и поляризованность $P = \epsilon_0 \epsilon E$:

$$U_2^*(t) \cong \frac{C_1}{C_2} U(t) = \frac{\epsilon_0 \epsilon S}{C_2} E(t) = \frac{S}{C_2} D(t) \cong \frac{S}{C_2} P(t). \quad (13)$$

Здесь учтено, что диэлектрическая проницаемость $\varepsilon = 1 + \varepsilon$ (ε – диэлектрическая восприимчивость) для сегнетоэлектриков много больше единицы, поэтому можно считать $\varepsilon \cong \varepsilon$ ($D \cong P$). Следовательно, отклонение электронного луча по вертикали осуществляется напряжением $U_2^*(t)$, которое пропорционально электрическому смещению D или поляризованности P сегнетоэлектрического образца.

В результате сложения сигналов $U_2(t)$ и $U_2^*(t)$ на экране электронного осциллографа (ЭО) наблюдается изображение замкнутой кривой, воспроизводящей в некотором масштабе петлю гистерезиса. Для определения масштаба изображения необходимо выполнить соответствующую калибровку осей экрана.

Для этого надо иметь в виду, что на экране осциллографа (X или Y) при подаче переменного напряжения на один из его входов будет наблюдаться светящаяся линия, длина l которой определяется удвоенной амплитудой этого сигнала. Отключим вход Y (см. рис. 4). Тогда на экране ЭО будем наблюдать горизонтальную светящуюся линию длиной l_x . Согласно (12), амплитуда $U_{m2} = R_2 E_m d / (R_1 + R_2)$ (E_m – амплитудное значение напряженности поля в образце). Но $U_{m2} = \delta_x l_x / 2$, где δ_x – чувствительность канала X осциллографа (В/дел), т. е. цена большого деления экрана ЭО для напряжения U_2 (горизонтальная ось). Поэтому $\delta_x l_x / 2 = (R_2 / (R_1 + R_2)) E_m d$. Отсюда $E_m = ((R_1 + R_2) / R_2 d) \cdot \delta_x \cdot l_x / 2$, или

$$E_m = \alpha_E \cdot x; \quad x = \frac{l_x}{2}; \quad \alpha_E = \frac{R_1 + R_2}{R_2 d} \delta_x, \quad (14)$$

где x – координата вершины петли на экране (в больших делениях горизонтальной шкалы); α – масштабный множитель, связывающий координату x вершины петли и амплитудное значение напряженности E поля в сегнетоэлектрике.

Теперь отключим вход X , а на вход Y подадим напряжение $U_2^*(t)$, снимаемое с линейного конденсатора C_2 . Согласно (13), амплитуда $U_{m2}^* = (S/C_2) D_m \approx (S/C_2) P_m$ (D_m и P_m – амплитудные значения соответственно электрического смещения и поляризованности диэлектрика). Так как $U_{m2}^* = \delta_y l_y / 2$, где δ_y – чувствительность канала Y осциллографа (В/дел), то $\delta_y l_y / 2 = (S/C_2) D_m \approx (S/C_2) P_m$. Отсюда $D_m \approx P_m = (C_2/S) \cdot \delta_y \cdot l_y / 2$, или

$$D_m \approx P_{em} = \alpha_D \cdot y; \quad y = \frac{l_y}{2}; \quad \alpha_D = \frac{C_2}{S} \delta_y, \quad (15)$$

где y – координата вершины петли на экране (в больших делениях вертикальной шкалы); α_D – масштабный множитель, связывающий координату y вершины и амплитудное значение электрического смещения D поля в сегнетоэлектрике (или поляризованности P образца).

В общем случае размеры и форма петли диэлектрического гистерезиса зависят от природы образца, его температуры, а также от амплитуды приложенного напряжения U . Если оси экрана осциллографа *прокалиброваны*, т. е. определены значения δ_x и δ_y , то можно, определив координаты x и y вершины петли, по формулам (14, 15) рассчитать E_m и D_m , а затем найти диэлектрическую проницаемость ϵ при заданном значении амплитуды напряженности поля ($D_m = \epsilon_0 \epsilon E_m$).

Блок-схема лабораторной установки изображена на рис. 5.

В передней части кассеты ФПЭ-02/07 расположена панель, на которой крепятся элементы C_1 , C_2 , R_1 и R_2 . Эти элементы и переменный резистор R_3 соединены между собой согласно схеме на рис. 4. Ручка «Рег. U » потенциометра R_3 выведена на лицевую панель кассеты.

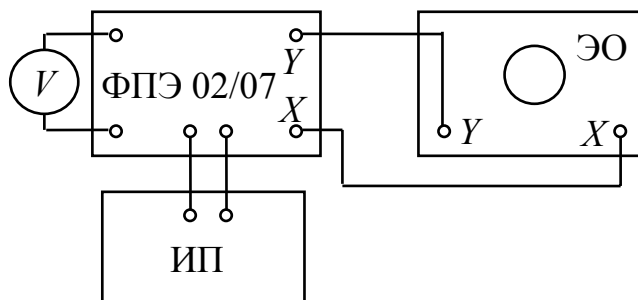


Рис. 5

К разъему кассеты подключен источник питания (ИП). К гнездам «PV» кассеты подключается вольтметр, а гнезда «РО» служат для подсоединения коаксиальными кабелями входов X и Y осциллографа.

Параметры измерительной цепи (R_1 ; R_2 ; C_2 ; d ; S ; δ_x) приведены в приложении к лабораторной работе.

3. Порядок выполнения работы и обработка результатов измерений

1. Подготовьте табл. 3 для занесения результатов измерений.

Таблица 3

$R_1 =$; $R_2 =$; $C_2 =$; $d =$; $S =$; $\delta_x =$; $\delta_y =$						
i	$U,$	$x,$	$y,$	$E_m,$	$D_m,$	ϵ

2. По схеме, приведенной на установке, проверьте соединение приборов. Значения параметров установки занесите в таблицу. Уясните назначение всех приборов и устройств. По инструкциям в приложении к установке подготовьте вольтметр и электронный осциллограф к работе. С разрешения преподавателя или лаборанта подключите приборы к сети.

3. Постепенно увеличивая напряжение (вращая по часовой стрелке ручку «Рег. U » источника питания) от нуля до максимального значения, проследите за изменением формы и размеров петли гистерезиса. С помощью ручки ЭО «В/дел» канала Y подберите чувствительность δ_y так, чтобы при максимальном напряжении U изображение петли занимало примерно $2/3$ экрана. По положению ручки «В/дел» определите чувствительность канала δ_y и занесите это значение в таблицу (положение ручки «В/дел» канала Y не изменяйте до окончания измерений).

4. Подайте в измерительную цепь максимальное напряжение U . С помощью ручек управления « Φ » и « \Leftrightarrow » ЭО расположите наблюдаемую петлю гистерезиса симметрично относительно осевых линий. Определите в больших делениях шкалы экрана координаты x и y одной из вершин петли и занесите их значения в таблицу.

5. Уменьшая напряжение на 5 В (а при малых значениях U – на 2–3 В), выполните каждый раз аналогичные измерения координат x и y .

6. Отключите все приборы установки от сети.

7. По формулам (14) и (15) рассчитайте масштабные множители α_E , α_D и значения E_m и D_m при всех значениях напряжения U .

8. Для каждой пары значений E_m и D_m с помощью формулы $D_m = \varepsilon_0 \varepsilon E_m$ рассчитайте диэлектрическую проницаемость ε образца.

9. Постройте графики зависимостей $D_m = f(E_m)$ и $\varepsilon = f(E_m)$.

10. Полученные значения ε сравните по порядку величины со справочными значениями для сегнетоэлектриков.

Лабораторная работа № 34

ИЗМЕРЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЙ С ПОМОЩЬЮ МОСТА УИТСТОНА

Цель работы: изучить законы Ома и правила Кирхгофа для электрических цепей постоянного электрического тока; освоить мостовой метод измерения сопротивления R .

1. Теоретическое введение

Пользуясь конспектом и рекомендуемой литературой, изучите тео-

ретический материал темы и изложите письменно ответы на следующие вопросы (изложение должно содержать текст, формулы, рисунки).

1. Электрический ток, его характеристики (сила тока, плотность тока) и условия существования. Электродвижущая сила.

2. Электрическое сопротивление. Удельные сопротивление и проводимость.

3. Вывод формулы для расчета электрического сопротивления проводников при их последовательном и параллельном соединении.

4. Законы Ома для однородного и неоднородного участков цепи. Закон Ома для замкнутой цепи.

5. Правила Кирхгофа. Правила знаков для I , U и \mathcal{E} при составлении уравнений для узлов и контуров.

2. Описание установки и метода измерений

Мост Уитстона состоит из четырех резисторов, соединенных в замкнутый четырехугольный контур (рис. 6), каждая сторона которого называется *плечом* моста. В одну (измерительную) диагональ такого контура включается гальванометр G , а в другую – источник постоянного тока с электродвижущей силой \mathcal{E} . При произвольных значениях сопротивлений R_1, R_2, R_3, R_4 в этих резисторах будут протекать токи силой I_1, I_2, I_3, I_4 соответственно. И в измерительной диагонали гальванометр G покажет некоторую силу тока I_G . Такой мост называется *неуравновешенным*.

Однако сопротивления плеч моста можно подобрать так, чтобы ток в цепи гальванометра отсутствовал ($I_G = 0$). Такой мост называется *уравновешенным*. Условие $I_G = 0$ достигается при определенном соотношении между сопротивлениями плеч моста. Установим это соотношение.

Согласно *второму правилу Кирхгофа*, для контура $ABDA$ (см. рис. 6): $I_1 R_1 - I_4 R_4 = 0$, или $I_1 R_1 = I_4 R_4$; для контура $BCDB$: $I_3 R_3 - I_2 R_2 = 0$, или $I_2 R_2 = I_3 R_3$. Если разделим первое уравнение на второе,

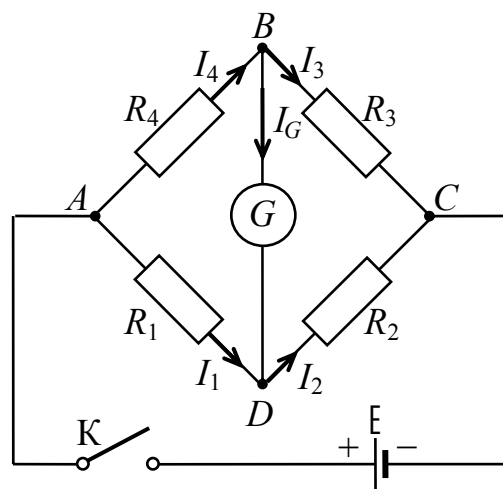


Рис. 6

то получим $\frac{I_1 R_1}{I_2 R_2} = \frac{I_4 R_4}{I_3 R_3}$. Так как ток в измерительной диагонали отсутствует ($I_G = 0$), то, согласно *первому правилу Кирхгофа*, $I_1 = I_2$ для узла D и $I_3 = I_4$ для узла B . Учитывая это, получаем

$$R_1 / R_2 = R_4 / R_3. \quad (16)$$

Таким образом, используя уравновешенный мост Уитстона, можно по трем известным сопротивлениям определить неизвестное, например, сопротивление R_4 . Из условия равновесия (16) следует, что

$$R_x = R_4 = R_3 \cdot R_1 / R_2. \quad (17)$$

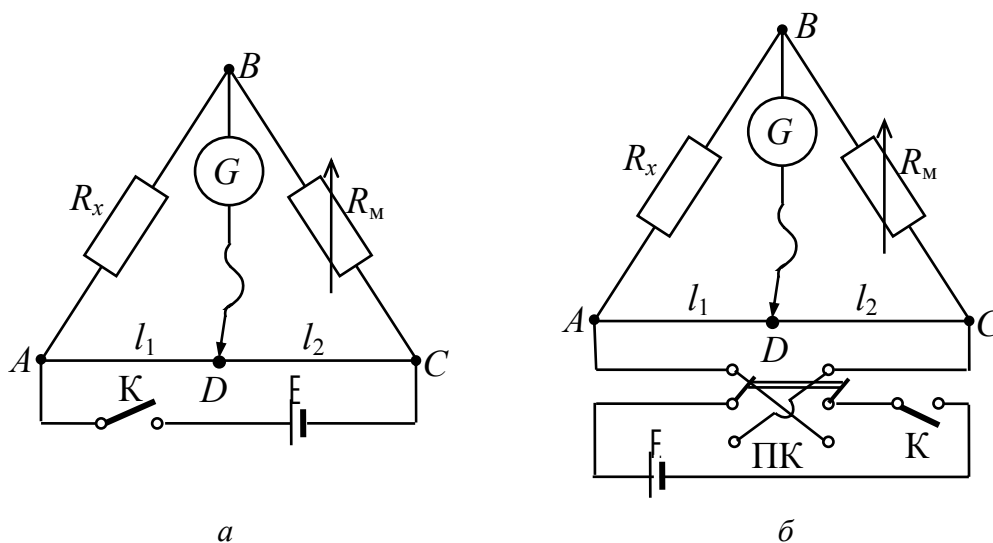


Рис. 7

На практике при использовании соотношения (17) резисторы с сопротивлениями R_1 и R_2 обычно заменяют реохордом (рис. 7, а и б). *Реохорд* представляет собой *калиброванную проволоку* с большим удельным сопротивлением ρ , по которой может скользить подвижный контакт D . Если собрать цепь, состоящую из реохорда AC , неизвестного сопротивления R_x и магазина сопротивлений R_M , то процесс уравнивания моста значительно упрощается: необходимо при заданном значении R_M передвигать контакт D до тех пор, пока стрелка гальванометра при включенном источнике тока не установится на нулевом делении, либо при заданном положении контакта D нужно изменить сопротивление R_M до исчезновения тока в измерительной диагонали.

Поскольку $R = \rho \cdot l / S$ (где ρ – удельное сопротивление материала реохорда, а S – площадь его поперечного сечения), то $R_1 / R_2 = l_1 / l_2$, где

l_1 и l_2 – длины частей реохорда, на которые его делит контакт D в заданном положении. Тогда с учетом того, что $R_4 = R_x$, $R_3 = R_m$, формула (17) примет вид

$$R_x = R_m \cdot l_1 / l_2. \quad (18)$$

Точность измерения сопротивления R_x с помощью уравновешенного моста Уитстона достаточно высока, если длины l_1 и l_2 плеч реохорда мало отличаются друг от друга.

3. Порядок выполнения работы и обработка результатов измерений

1. Подготовьте табл. 4 для занесения результатов измерений.

Таблица 4

Измеряемое сопротивление	l_1 ,	l_2 ,	R_m ,	R_x ,	R_{cp} ,
R_{1x}					

2. Соберите электрическую цепь согласно рис. 7, а или 7, б. В качестве резистора R_x включите резистор с неизвестным сопротивлением R_{1x} . После проверки преподавателем или лаборантом собранной схемы приступите к измерениям.

3. Установите подвижный контакт D посередине реохорда ($l_1 = l_2$) и, замкнув цепь ключом K , выберите такое сопротивление R_m магазина, чтобы в измерительной диагонали гальванометра G ток исчез. Значение R_m занесите в таблицу.

4. Увеличивая и уменьшая l_1 на Δl (значение Δl указано в таблице вариантов на установке), опять уравновесьте мост Уитстона. Значения l_1 , l_2 и R_m занесите в табл. 4.

5. Аналогично выполните измерения сопротивлений второго и третьего резисторов, а также общего сопротивления при их последовательном $R_x^{посл}$ и параллельном $R_x^{пар}$ соединении.

6. По формуле (18) для каждого измеряемого сопротивления найдите три значения, соответствующее трем разным значениям l_1 , и рассчитайте среднее значение измеряемого сопротивления.

7. Используя средние значения сопротивлений R_{1x}^{cp} , R_{2x}^{cp} и R_{3x}^{cp} , рассчитайте их общее сопротивление по формулам для последова-

тельного и параллельного соединения резисторов. Сравните данные теоретических расчетов с результатами экспериментальных измерений и определите их относительную погрешность.

8. При выполнении измерений для электрической цепи, собранной по схеме на рис. 7, б, измените направление электрического тока переключателем (ПК) на противоположное. Изменилось ли состояние равновесия моста Уитстона? Если изменилось, то объясните возможную причину нарушения равновесия.

Лабораторная работа № 35

ИЗУЧЕНИЕ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ ВОДНЫХ РАСТВОРОВ

Цель работы: ознакомиться с механизмом электропроводности электролитов и освоить методику измерения удельной проводимости σ мостовым методом; исследовать зависимость удельной проводимости σ раствора от его концентрации.

1. Теоретическое введение

Пользуясь конспектом и рекомендуемой литературой, изучите теоретический материал темы и изложите письменно ответы на следующие вопросы (изложение должно содержать текст, формулы, рисунки).

1. Электролитическая диссоциация. Электролиз.
2. Законы Фарадея для электролиза.
3. Закон Ома в дифференциальной форме для электролитов.

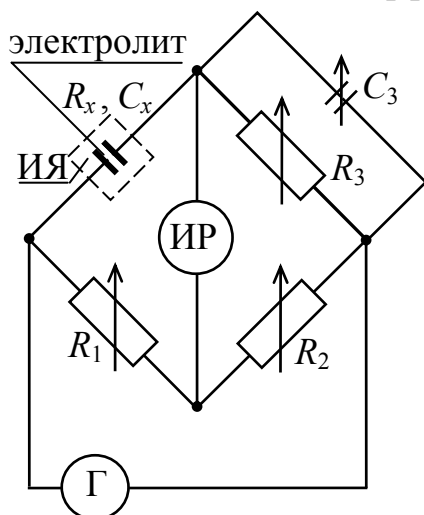


Рис. 8

4. Зависимость удельной электропроводности водных растворов от концентрации и от температуры.

2. Описание установки и метода измерений

Для измерения сопротивления растворов электролитов в работе используется *уравновешенный 4-плечный мост* (см. лабораторную работу № 34) переменного тока. Его упрощенная схема приведена на рис. 8, где R_1 и R_2 – плечи отношения; R_3 – плечо сравнения; R_x – измеряемое сопротивление; ИР – индикатор

равновесия моста; Г – генератор фиксированной частоты.

Емкостное сопротивление ($X_C = 1/(\omega C_x)$) измерительной ячейки компенсируется при равновесии моста с помощью переменной емкости C_3 . Измерительная ячейка (ИЯ) (рис. 9) представляет собой стеклянную U-образную трубку, которая заполнена раствором электролита. В

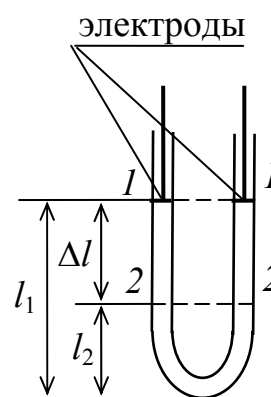


Рис. 9

трубке размещены два электрода, каждый из которых может независимо опускаться либо подниматься с помощью *кремальерной передачи*. Пусть

R'_x – сопротивление электролита при положении электродов на уровне 1–1 (l_1), а R''_x – его сопротивление при положении электродов на уровне 2–2 (l_2). Разность этих сопротивлений ($R'_x - R''_x$) равна сопротивлению двух столбиков электролита высотой $\Delta l = l_1 - l_2$. Применив формулу $R = \rho \cdot l/S$, получим

$$R'_x - R''_x = 2\rho \frac{\Delta l}{S} = \rho \frac{8\Delta l}{\pi d^2},$$

где ρ – удельное сопротивление; d – диаметр электрода.

Последнее соотношение позволяет определить удельную проводимость σ раствора

$$\sigma = \frac{1}{\rho} = \frac{8\Delta l}{\pi d^2 \cdot (R'_x - R''_x)}. \quad (19)$$

Исследуемыми электролитами являются водные растворы некоторых солей, кислот или щелочей с заданными массовыми концентрациями.

3. Порядок выполнения работы и обработка результатов измерений

1. Подготовьте табл. 5 для занесения результатов измерений.

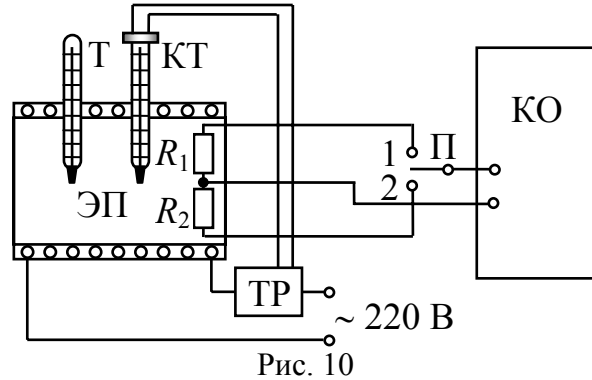
Таблица 5

Концентрация n	l_1 ,	l_2 ,	Δl ,	R'_x ,	R''_x ,	σ ,

2. Описание установки и метода измерений

Схема лабораторной установки для измерения электрического сопротивления проводников приведена на рис. 10.

Проволочные сопротивления R_1 и R_2 , изготовленные из исследуемых материалов, размещены в электрической печи (ЭП). Для задания и поддержания требуемой температуры служит *контактный термометр* (КТ) и *терморегулятор* (ТР). Температура в печи определяется по ртутному термометру (Т). Сопротивление проволочных резисторов измеряется с помощью цифрового килоомметра (КО). Переключатель (П) дает возможность подключать к килоомметру поочередно измеряемые сопротивления R_1 и R_2 .



Число Лоренца L определяется из графика экспериментальной зависимости $\alpha/\sigma = f_1(T)$. Удельная проводимость $\sigma = 1/\rho$ рассчитывается по измеренному сопротивлению R ($R = \rho l/S$; S – площадь сечения проволочного сопротивления, а l – его длина). Коэффициент теплопроводности α находится из справочных данных, представленных графически в приложении к установке.

Сопротивление R_0 при 0°C и температурный коэффициент сопротивления α металла определяются из графика экспериментальной зависимости $R = f_2(t^\circ)$ с использованием формулы $R = R_0(1 + \alpha t^\circ)$.

3. Порядок выполнения работы и обработка результатов измерений

1. Подготовьте табл. 6 для занесения результатов измерений.

Таблица 6

i	$t, ^\circ\text{C}$	$T,$	$R_1,$	$R_2,$	$\sigma,$	$\alpha,$	$\alpha/\sigma,$

2. Ознакомьтесь с расположением и назначением отдельных приборов установки. По приложению к установке изучите инструкции по использованию контактного термометра и килоомметра. С разрешения преподавателя или лаборанта подключите установку и килоомметр к сети (электропечь должна быть отключена).

3. С помощью цифрового килоомметра измерьте сопротивления двух проволочных резисторов при комнатной температуре t_1 . Значения температуры t_1 и сопротивлений R_1 и R_2 занесите в таблицу.

4. Измерьте сопротивления R_1 и R_2 при температуре на 10°C больше t_1 . Для этого установите по контактному термометру температуру $t = t_1 + 10^\circ\text{C}$. Включите нагрев электропечи (нагревание до $45\text{--}50^\circ\text{C}$ следует проводить при уменьшенной мощности нагревателя ЭП, регулируя мощность нагрева реостатом печи). После достижения заданной температуры измерьте R_1 и R_2 .

5. Проведите аналогичные измерения сопротивлений R_1 и R_2 , каждый раз увеличивая температуру по контактному термометру на 10°C . Измерения проводить до $90\text{--}100^\circ\text{C}$.

6. Для каждой устанавливаемой температуры занесите в таблицу справочные данные для коэффициента теплопроводности α одного из металлов, которые представлены в приложении в виде графика $\alpha = f(T)$. Для этого же металла при всех значениях температуры рассчитайте удельную электропроводность, используя формулу $R = \rho l/S$ (l и S указаны в приложении к установке).

7. Найдите отношение α/σ для каждой измеренной температуры и постройте график зависимости $\alpha/\sigma = f_1(T)$. Проверьте выполняемость закона Видемана – Франца и по графику определите число Лоренца ($L = \Delta(\alpha/\sigma)/\Delta T$). Сравните полученное экспериментальное значение с теоретическим и найдите их относительную погрешность.

8. Постройте график зависимости $R = f_2(t^\circ)$ для другого металла. С помощью графика на основании формулы $R = R_0 (1 + \alpha t^\circ)$ определите значения: R_0 (R_0 – сопротивление при 0°C) и α ($\alpha = (1/R_0) (\Delta R/\Delta t^\circ)$ – температурный коэффициент сопротивления металла).

Лабораторная работа № 37

ИЗУЧЕНИЕ РАБОТЫ ВАКУУМНОГО ДИОДА И ОПРЕДЕЛЕНИЕ УДЕЛЬНОГО ЗАРЯДА ЭЛЕКТРОНА

Цель работы: изучить явление термоэлектронной эмиссии и принцип работы вакуумного диода; получить вольт-амперную характеристику вакуумного диода; определить удельный заряд электрона.

1. Теоретическое введение

Пользуясь конспектом и рекомендуемой литературой, изучите теоретический материал темы и изложите письменно ответы на следующие

вопросы (изложение должно содержать текст, формулы, рисунки).

1. Краткая характеристика типов электронной эмиссии.
2. Вольт-амперная характеристика вакуумного диода. Закон Богуславского – Ленгмюра (*закон трех вторых*).
3. Плотность тока. Работа выхода. Формула Ричардсона – Дешмана.

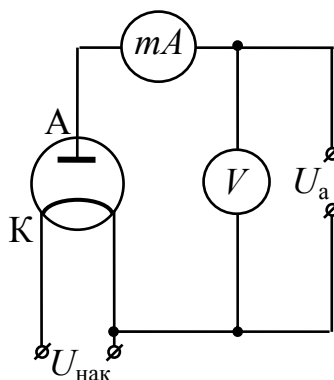


Рис. 11

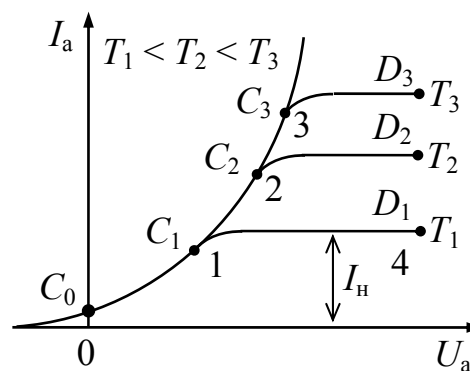


Рис. 12

2. Описание установки и метода измерений

Явление термоэлектронной эмиссии лежит в основе работы электронных ламп, электронно-лучевых трубок и других приборов. Простейшей электронной лампой является двухэлектродная (*диод*). Диод представляет собой стеклянный или металлический баллон, откачанный до глубокого вакуума, с двумя электродами – *анодом* А и *катодом* К (рис. 11). Обычно анод имеет форму кругового цилиндра, а катод – проволочной спирали из тугоплавкого металла (вольфрам, молибден и др.), натянутой вдоль оси этого цилиндра.

При включении диода в электрическую цепь (рис. 11) катод нагревается до определенной температуры T , соответствующей заданному напряжению накала ($U_{\text{нак}}$). Испускаемые катодом электроны образуют вокруг катода отрицательный распределенный пространственный заряд – *электронное облако*. Если анодное напряжение U_a равно нулю, то это облако задерживает вылетающие из катода электроны и возвращает их обратно. Однако небольшая доля самых быстрых электронов все же достигает анода, поэтому даже при $U_a = 0$ в анодной цепи течет очень малый ток (рис. 12). С увеличением анодного напряжения, измеряемого вольтметром V , все большее число электронов «вытягивается» из облака электрическим полем к аноду и сила I_a

анодного тока возрастает в соответствии с участком кривой CC_1 . При некотором значении U_a электронное облако полностью рассасывается, и все вылетающие из катода электроны (за каждую единицу времени) достигают анода. Сила анодного тока в этом случае достигает своего максимального значения и называется *током насыщения* I_n . Далее ток перестает практически зависеть от анодного напряжения (участок C_1D_1). График зависимости силы I_a анодного тока от анодного напряжения U_a (кривая C_1D_1) называется *вольт-амперной характеристикой диода*. С повышением температуры T катода ток насыщения возрастает, начальные же участки этой характеристики совпадают.

Термоэлектронная эмиссия катода характеризуется плотностью тока насыщения ($j_n = I_n/S$). Исходя из квантовых представлений установлено, что плотность тока насыщения

$$j_n = B' \cdot T^2 \cdot \exp(-A/kT). \quad (20)$$

Выражение (20) называется *формулой Ричардсона – Дешмана*. В этой формуле B' – эмиссионная постоянная; T – абсолютная температура катода; A – работа выхода электрона из металла; k – постоянная Больцмана. Из формулы (20) следует, что эмиссионная способность катода, т. е. плотность тока насыщения, зависит от его температуры и работы выхода электрона.

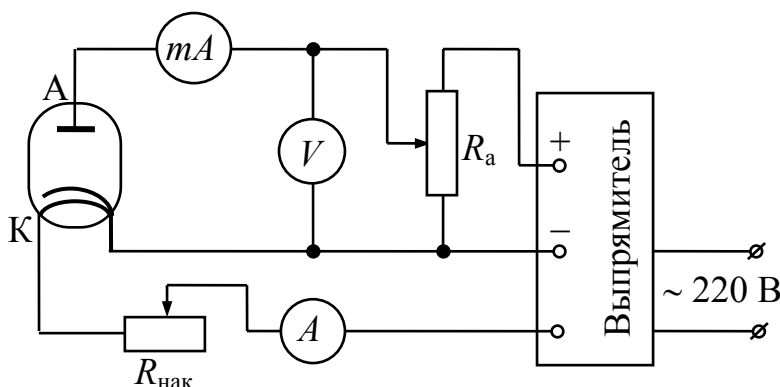


Рис. 13

Схема лабораторной установки приведена на рис. 13. Анодное напряжение U_a подается от выпрямителя. Величина U_a регулируется делителем напряжения R_a и измеряется вольтметром V . Сила I_a анодного то-

ка измеряется миллиамперметром mA , напряжение накала ($U_{нак}$) подается от понижающей обмотки трансформатора выпрямителя. Ток накала регулируется реостатом R_n и измеряется амперметром A .

В интервале сравнительно малых значений анодного напряжения U_a зависимость $I_a = f(U_a)$ выражается *законом Богуславского – Ленгмюра* (законом «трех вторых»)

$$I_a = B \cdot U_a^{3/2}, \quad (21)$$

где B – коэффициент, характеризующий форму и размеры электродов и не зависящий от температуры катода.

Для цилиндрического анода и коаксиального с ним катода коэффициент B равен

$$B = 3,94\epsilon_0 \left(\frac{l}{r\beta^2} \right) \sqrt{\frac{e}{m}}, \quad (22)$$

где ϵ_0 – электрическая постоянная; l – длина катода; r – радиус анода; β – коэффициент, зависящий от отношения радиусов анода и катода; e – заряд электрона; m – масса электрона.

Из формулы (22) можно выразить e/m – *удельный заряд электрона*

$$\frac{e}{m} = \left(\frac{r\beta^2}{3,94l} \right)^2 \frac{B^2}{\epsilon_0^2}. \quad (23)$$

Параметры радиолампы, используемой в качестве диода, приведены на установке.

При определении удельного заряда электрона описанным методом могут возникать погрешности до 20%, не зависящие от точности используемых приборов. Основные причины этих погрешностей следующие. При выводе уравнения (22) предполагалось, что начальные скорости электронов, испускаемых катодом, равны нулю. В действительности термоэмиссионные электроны распределены по скоростям в соответствии с распределением Максвелла. Неточности будут и из-за некоторой асимметрии системы электродов лампы. Кроме того, если баллон не очень хорошо откачан, то уже при сравнительно невысоких анодных напряжениях будет происходить ионизация газа. Возникшие положительные ионы вызовут частичную нейтрализацию отрицательного пространственного заряда, и поэтому анодный ток будет возрастать быстрее, чем это следует из закона «трех вторых».

3. Порядок выполнения работы и обработка результатов измерений

1. Подготовьте табл. 7 для занесения результатов измерений.

Таблица 7

i	U_a ,	$U_a^{3/2}$,	I_a ,			B ,	$\frac{e}{m}$,	$\left(\frac{e}{m}\right)_{\text{ср}}$,
			$I_{1 \text{ накл}} =$	$I_{2 \text{ накл}} =$	$I_{3 \text{ накл}} =$			

2. Пользуясь схемой (рис. 13), ознакомьтесь с расположением измерительных и реостатов, включенных в *анодную цепь* и *цепь накала* лампы. Уясните назначение этих приборов и устройств, приемы управления ими. Сопротивление реостата $R_{\text{накл}}$ сделайте максимальным, а реостата R_a – минимальным. С разрешения преподавателя или лаборанта подключите установку к сети.

Примечание: Прежде чем приступить к выполнению п. 3, нужно подобрать необходимый предел измерений для каждого из используемых измерительных приборов, а затем определить соответствующую этим пределам цену деления шкалы каждого прибора.

3. Установите по амперметру в цепи накала ток $I_{\text{накл}}$ (значения токов накала указаны на установке). Изменяя реостатом R_a анодное напряжение U_a от 0 до 200 В через каждые 20 В, снимите показания I_a миллиамперметра и занесите их в таблицу.

4. Выполните такие же измерения еще при двух других значениях $I_{\text{накл}}$ из заданного интервала токов накала.

5. Постройте вольт-амперную характеристику диода $I_a = f_1(U_a)$ при первом токе накала.

6. Для трех разных токов накала $I_{\text{накл}}$ постройте три графика зависимости анодного тока I_a от анодного напряжения в степени $3/2$, т. е. $I_a = f_2(U_a^{3/2})$. Установите, в каком интервале анодных напряжений выполняется закон Богуславского – Ленгмюра.

7. Используя начальные (линейные) участки графиков $I_a = f_2(U_a^{3/2})$, найдите значения их угловых коэффициентов B ($B = \Delta I_a / (\Delta U_a^{3/2})$, см. уравнение (21)).

8. По формуле (23) рассчитайте удельный заряд электрона e/m , используя найденные значения коэффициента B . Определите среднее значение удельного заряда $(e/m)_{\text{ср}}$ и сравните его со справочным значением (рассчитайте относительную погрешность).

Лабораторная работа № 38

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАБОТЫ ВЫХОДА ЭЛЕКТРОНА ИЗ МЕТАЛЛА

Цель работы: изучить явление термоэлектронной эмиссии и принцип работы вакуумного диода; ознакомиться с методикой определения работы выхода электрона с помощью *формулы Ричардсона – Дешмана*.

1. Теоретическое введение

Пользуясь конспектом и рекомендуемой литературой, изучите теоретический материал темы и изложите письменно ответы на следующие вопросы (изложение должно содержать текст, формулы, рисунки).

1. Краткая характеристика типов электронной эмиссии.
2. Вольт-амперная характеристика вакуумного диода. Закон Бомслювского – Ленгмюра (*закон трех вторых*).
3. Плотность тока. Работа выхода. Формула Ричардсона – Дешмана.

2. Описание установки и метода измерений

Схема лабораторной установки представлена на рис. 14.

Источником необходимых напряжений для анодной цепи и цепи накала катода служит выпрямитель. Величина анодного напряжения U_a регулируется делителем R_a и измеряется вольтметром V_1 , а сила анодного тока I_a измеряется миллиамперметром mA . Для измерения напряжения накала $U_{нак}$ используется вольтметр V_2 . Сила тока накала $I_{нак}$ в цепи катода регулируется переменным резистором $R_{нак}$ и измеряется амперметром A .

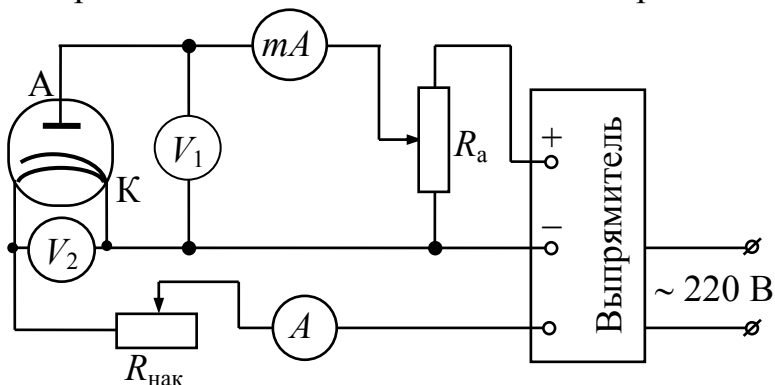


Рис. 14

Известно, что величина плотности тока насыщения j_n может быть определена по *формуле Ричардсона – Дешмана*

$$j_n = B' T^2 \exp(-A/kT), \quad (24)$$

где B' – эмиссионная постоянная; T – абсолютная температура катода; A – работа выхода электрона из металла; k – постоянная Больцмана.

С учетом того, что сила тока насыщения $I_n = j_n S$ (S – площадь эмиссионной поверхности катода), получим

$$I_{\text{н}} = B' S T^2 \exp(-A/kT). \quad (25)$$

Выведем формулу для расчета работы выхода A . Учитывая, что она практически не зависит от температуры, запишем выражение (25) для двух различных температур T_1 и T_2 катода, которым соответствуют значения силы тока насыщения $I_{\text{н1}}$ и $I_{\text{н2}}$.

$$I_{\text{н1}} = B' S T_1^2 \exp(-A/kT_1); \quad I_{\text{н2}} = B' S T_2^2 \exp(-A/kT_2). \quad (26)$$

Взяв отношение выражений (26) и прологарифмировав полученное уравнение, получим

$$A = k T_1 T_2 / (T_2 - T_1) [\ln(I_{\text{н2}}/I_{\text{н1}}) - 2 \ln(T_2/T_1)]. \quad (27)$$

Работу выхода обычно выражают в электронвольтах, поэтому перепишем формулу (27) с учетом того, что $1 \text{ эВ} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$. Расчетная формула для работы A примет следующий вид

$$A = 8,93 \cdot 10^{-5} \frac{T_1 \cdot T_2}{T_2 - T_1} \left[\ln \frac{I_{\text{н2}}}{I_{\text{н1}}} - 2 \ln \frac{T_2}{T_1} \right] (\text{эВ}). \quad (28)$$

Для расчета работы выхода по формуле (28) необходимо знать температуру катода. В данной лабораторной работе она определяется косвенным путем. Зная $U_{\text{нак}}$ и $I_{\text{нак}}$, на основе закона Ома можно найти сопротивление нити накала $R_t = U_{\text{нак}}/I_{\text{нак}}$ при данной температуре t . Затем по графику зависимости сопротивления катода от температуры $R_t = f(t)$, которая была предварительно экспериментально измерена для данной лампы, можно определить температуру ее катода (график $R_t = f(t)$ прилагается).

3. Порядок выполнения работы и обработка результатов измерений

1. Подготовьте табл. 8 для занесения результатов измерений.

Таблица 8

i	$U_{\text{а}},$	$I_{\text{а}},$					
		$I_{1 \text{ на к}} =$	$U_{1 \text{ на к}} =$	$I_{2 \text{ на к}} =$	$U_{2 \text{ на к}} =$	$I_{3 \text{ на к}} =$	$U_{3 \text{ на к}} =$
		$R_{t1} =$	$T_1 =$	$R_{t2} =$	$T_2 =$	$R_{t3} =$	$T_3 =$

2. Пользуясь схемой (рис. 14), ознакомьтесь с расположением измерительных приборов и реостатов, включенных в анодную цепь и цепь накала лампы. Уясните назначение этих приборов и устройств, приемы управления ими. Сопротивление реостата $R_{\text{нак}}$ сделайте максимальным, а реостата $R_{\text{а}}$ – минимальным. С разрешения преподава-

теля или лаборанта подключите установку к сети.

Примечание. Прежде чем приступить к выполнению п. 3, нужно подобрать необходимый предел измерений для каждого из используемых измерительных приборов, а затем определить соответствующую этим пределам цену деления шкалы каждого прибора.

3. Установите по амперметру A силу тока $I_{\text{нак}}$ в цепи накала (значения токов накала указаны на установке) и измерьте вольтметром V_2 соответствующее ему значение $U_{\text{нак}}$. Изменяя анодное напряжение U_a от 0 до 240 В через каждые 20 В (по вольтметру V_1), снимите показания I_a миллиамперметра и занесите их в табл. 8.

4. Выполните аналогичные измерения для двух других значений тока накала $I_{\text{нак}}$.

5. Рассчитайте сопротивления нити накала R_i при заданных режимах работы катода. По прилагаемому графику определите соответствующие значения температуры катода.

6. Постройте вольт-амперные характеристики диода – графики зависимостей силы анодного тока от анодного напряжения при заданных условиях работы лампы. Определите значения силы тока насыщения при соответствующих температурах катода.

7. По формуле (28) рассчитайте значения работы выхода электрона для трех различных пар значений температур катода. Найдите среднее значение работы выхода.

Лабораторная работа № 39

ГРАДУИРОВАНИЕ ТЕРМОПАРЫ

Цель работы: изучить термоэлектрические явления; освоить методику градуирования термопары.

1. Теоретическое введение

Пользуясь конспектом и рекомендуемой литературой, изучите теоретический материал темы и изложите письменно ответы на следующие вопросы (изложение должно содержать текст, формулы, рисунки).

1. Контактная разность потенциалов. Внутренняя и внешняя контактные разности потенциалов.

2. Первый и второй законы Вольта.

3. Явление термоэлектричества (*эффект Зеебека*). Термоэлектродвижущая сила. Дифференциальная термоЭДС. Термопара.

4. *Эффекты Пельтье и Томсона.*

2. Описание установки и метода измерений

Лабораторная установка (рис. 15) состоит из следующих частей: ЭП – электрическая печь; mV – милливольтметр; ТП – термопара (железо – константан); ТСС – термостатирующий сосуд; T_1 и T_2 – ртутные термометры.

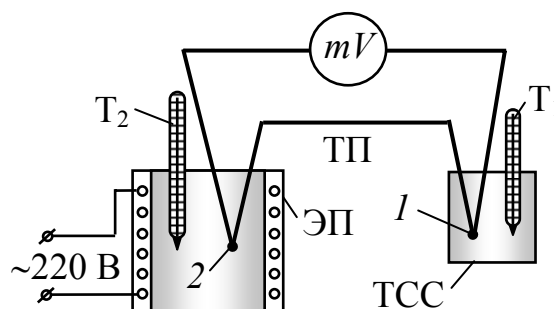


Рис. 15

Холодный спай 1 термопары поддерживается при постоянной температуре (например, при комнатной). Спай 2, помещенный в электрическую печь, температура которой подлежит измерению, является *горячим спаем*.

Термоэлектродвижущая сила E_T измеряется милливольтметром mV , она пропорциональна разности температур $\Delta t = t_2 - t_1$ спаев 1 и 2. Согласно классической теории,

$$E_T = \alpha (t_2 - t_1) = \frac{k}{e} \ln \frac{n_{01}}{n_{02}} (t_2 - t_1), \quad (29)$$

где α – *дифференциальная термоЭДС*, которая является практически постоянной величиной для данной термопары в заданном интервале температур; k – постоянная Больцмана; e – элементарный заряд; n_{01} и n_{02} – концентрации электронов проводимости соответственно в первом и втором металлах.

3. Порядок выполнения работы и обработка результатов измерений

1. Подготовьте табл. 9 для занесения результатов измерений.

Таблица 9

i	$t_1, ^\circ\text{C}$	$t_2, ^\circ\text{C}$	$\Delta t, ^\circ\text{C}$	$E_T,$	$\alpha,$

2. Ознакомьтесь с расположением и назначением отдельных приборов установки.

3. Отметьте показания t_1 и t_2 термометров T_1 и T_2 и с разрешения преподавателя или лаборанта включите электропечь в сеть.

4. Выполните измерения термоЭДС при разности температур спаев $\Delta t = t_2 - t_1$ от 0 до 120°C через каждые 10°C.

5. По данным измерений постройте график зависимости $E_T = f(\Delta t)$ (в соответствии с выражением (29) график должен представлять собой линейную зависимость). На основе этого графика определите дифференциальную термоЭДС α используемой термопары, которая равна тангенсу угла наклона прямой, то есть $\alpha = \Delta E_T / \Delta t$.

6. Исходя из того, что на один атом железа приходится два электрона проводимости, получите формулу для концентрации n_{01} электронов проводимости в железе ($n_{01} = 2\rho_{Fe} \cdot N_A / M_{Fe}$, где M_{Fe} – молярная масса железа; ρ_{Fe} – плотность железа; N_A – число Авогадро). По рассчитанному значению n_{01} , используя формулу (29), определите концентрацию n_{02} электронов проводимости в константане.

Лабораторная работа № 40

ИЗУЧЕНИЕ РАБОТЫ ЭЛЕКТРОННОГО ОСЦИЛЛОГРАФА

Цель работы: ознакомиться с устройством *электронного осциллографа* и изучить правила пользования им; освоить методику измерения параметров электрических сигналов с помощью осциллографа.

1. Теоретическое введение

Пользуясь конспектом и рекомендуемой литературой, изучите теоретический материал темы и изложите письменно ответы на следующие вопросы (изложение должно содержать текст, формулы, рисунки).

1. Явление термоэлектронной эмиссии. Работа выхода.
2. Движение зарядов в однородном электрическом поле, созданном, например, заряженным плоским конденсатором.
3. Траектория движения электрона, влетающего в однородное электрическое поле: а) вдоль силовых линий ($\vec{v}_0 \parallel \vec{E}$); б) перпендикулярно силовым линиям ($\vec{v}_0 \perp \vec{E}$).

2. Описание установки и метода измерений

Осциллограф – это электроннолучевой прибор, предназначенный для визуального наблюдения электрических (или преобразованных в электрические) сигналов и измерения их характеристик (период, амплитуда, частота и т. д.).

Основным элементом электронного осциллографа является *электронно-лучевая трубка* (ЭЛТ). Она представляет собой стеклян-

ную колбу (рис. 16), откачанную до высокого вакуума, с вмонтированными в нее системой электродов и отклоняющими пластинами в виде обкладок плоских конденсаторов. Внутренняя поверхность передней части колбы покрыта флюоресцирующим веществом и играет роль экрана (Э).

Источником электронов служит *катод* (К), подогреваемый *нитью накала* (НН). Для уменьшения работы выхода электронов торцевая поверхность катода покрыта оксидным слоем. *Управляющий электрод* (УЭ) изготовлен в виде цилиндра с отверстием в доньшке. На него подается отрицательный потенциал (относительно катода) в несколько вольт, величина которого регулируется потенциометром R_1 . С помощью УЭ формируется и предварительно фокусируется пучок электронов; изменяя потенциал УЭ, можно управлять интенсивностью пучка, а значит и яркостью светящегося пятна на экране.

Далее расположены *фокусирующий* (A_1) и *ускоряющий* (A_2) аноды. Они также выполнены в виде цилиндров, причем первый из них имеет две или три диафрагмы. Чтобы электроны могли возбудить свечение экрана, им необходимо сообщить достаточно большую энергию. Поэтому на второй анод A_2 подается высокое напряжение (0,6–5 кВ). Потенциал же на A_1 составляет несколько сот вольт и регулируется потенциометром R_3 . Изменяя его, осуществляют окончательную фокусировку электронного пучка, т. е. добиваются четкого изображения светящегося пятна на экране. Ручки потенциометров R_1 («Яркость») и R_3 («Фокус») выведены на переднюю панель осциллографа. Вся система электродов ЭЛТ носит название *электронной пушки* (ЭП).

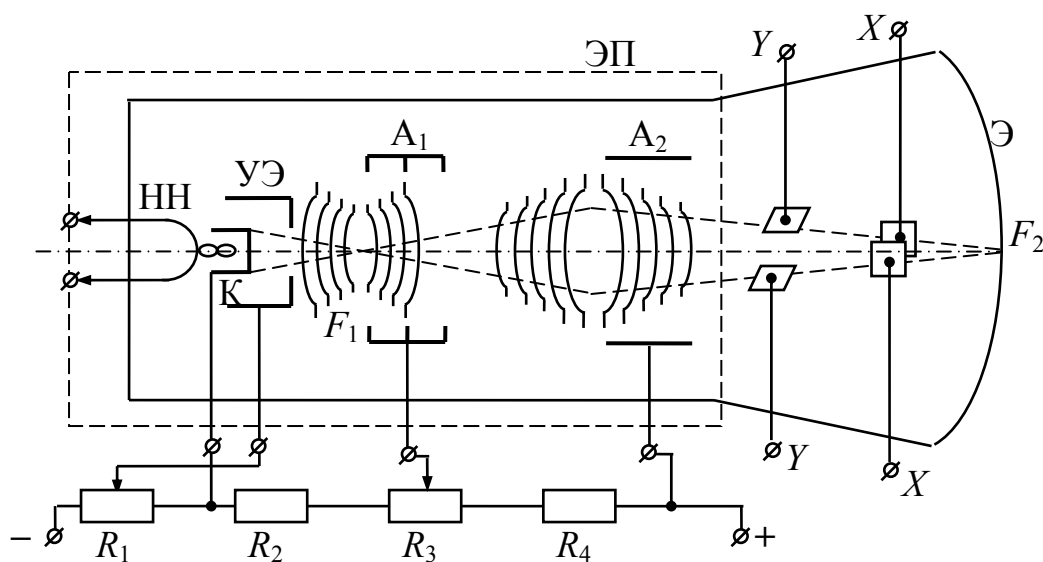


Рис. 16
32

Между управляющим электродом и первым анодом, а также между двумя анодами возбуждаются ускоряющие электрические поля определенной конфигурации. На рис. 16 схематично сплошными линиями изображены эквипотенциальные поверхности этих полей, а пунктиром – траектории электронов. Действие на электроны эквипотенциальных поверхностей, обращенных выпуклостью к катоду, аналогично действию собирающей линзы на лучи света. Действие же эквипотенциальных поверхностей, обращенных выпуклостью к экрану, равносильно действию рассеивающей линзы (рис. 17).

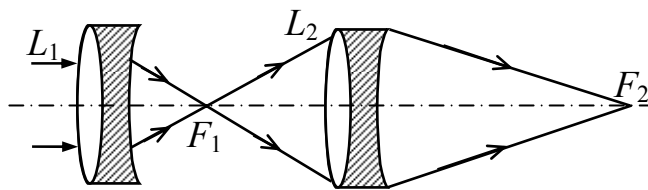


Рис. 17

Меняя потенциалы на электродах, можно изменять конфигурацию этих полей и тем самым характер сходимости пучка электронов. При определенных значениях потенциалов пучок фокусируется на экране Э осциллографа.

Сфокусированный электронный пучок (луч) проходит две пары *отклоняющих пластин* (обкладок плоского конденсатора), расположенных во взаимно перпендикулярных плоскостях. Горизонтально расположенные пластины (Y) служат для отклонения луча в вертикальном направлении (вдоль оси OY), а вертикально расположенные пластины (X) – в горизонтальном (вдоль оси OX). Если на какую-либо пару пластин подать постоянное напряжение U , то светящееся пятно на экране сместится в сторону положительно заряженной пластины. Величина этого смещения (координаты x или y пятна) от оси ЭЛТ пропорциональна приложенному напряжению U . Поэтому $U = \delta_x \cdot x$, или $U = \delta_y \cdot y$, где δ_x и δ_y – чувствительность ЭЛТ по напряжению соответственно вдоль осей OY и OX . Чувствительность осциллографических трубок зависит от их параметров и составляет (1÷10) В/мм. При подаче переменного напряжения $u = U_0 \sin \omega t$, например, на пластины Y , светящаяся точка будет смещаться вверх и вниз от центра экрана, так что в каждый момент времени $y = u / \delta_y$ (u – мгновенное значение напряжения). При быстрых колебаниях точки из-за инертности зрения мы увидим вертикальную светящуюся линию, длина которой $l_y = 2U_0 / \delta_y$.

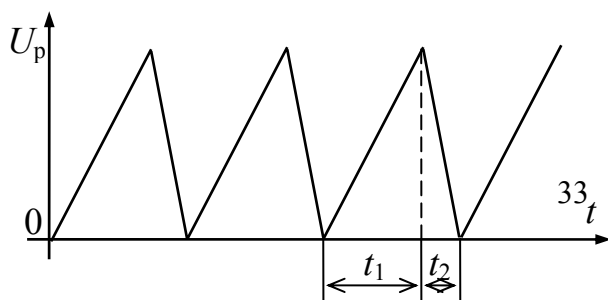


Рис. 18

Для исследования напряжения, изменяющегося во времени, используют две пары

пластин. На вертикально отклоняющие пластины подают исследуемый сигнал $U(t)$ с периодом T_x , а на пластины X – напряжение развертки U_p , источником которого является специальный генератор. В осциллографах наиболее часто используется пилообразное напряжение развертки (рис. 18), которое изменяется со временем по линейному закону. Характерно, что время его нарастания во много раз больше времени спадания, т. е. $t_1 \gg t_2$. Поэтому t_1 можно считать равным периоду T_p пилообразного напряжения развертки. Под действием такого напряжения электронный луч сначала смещается слева направо с постоянной скоростью, а затем практически мгновенно возвращается в исходное положение, создавая, таким образом, линейную развертку сигнала по времени. Если продолжительность смещения t_1 луча окажется равной ($T_p = T_x$) или кратной периоду изучаемого сигнала ($T_p = n \cdot T_x$), то на экране ЭО мы увидим неподвижное (фиксированное) изображение кривой изменения $U(t)$ в течение одного или n периодов. Важно, чтобы указанное равенство (или кратность) периодов стабильно поддерживалось во времени, в противном случае изображение будет «бежать». С этой целью генератор развертки подстраивают изучаемым сигналом, сетевым напряжением или сигналом внешнего генератора. Такой процесс управления режимом работы генератора развертки называется *синхронизацией*. На переднюю панель ЭО вынесены переключатель вида синхронизации, ручка потенциометра для регулировки амплитуды синхронизирующего напряжения, а также ручки для грубой и плавной регулировки частоты генератора развертки.

На рис. 19 приведена упрощенная блок-схема электронного осциллографа. Основными блоками осциллографа являются усилители вертикального и горизонтального отклонения, генератор развертки, блок синхронизации развертки, блок питания (*не показан*).

Так как чувствительность трубок невелика, то при исследовании малых напряжений их предварительно необходимо усилить. Для этой цели служат *усилитель вертикального отклонения* (усилитель Y) и *усилитель горизонтального отклонения* (усилитель X), выходы которых подключены соответственно к пластинам Y и X . Для установления на экране картины нужного размера напряжение, подаваемое на вход усилителя, регулируют (плавно или ступенчато) делителями.

Возможность преобразования механических, химических, световых, тепловых и других величин в электрические сигналы позволяет применять осциллографы во многих областях науки и техники. С помощью специальных осциллографов можно наблюдать (или фотографировать) очень медленные периодические процессы и очень быстрые колебания, а также одиночные импульсы сложной формы.

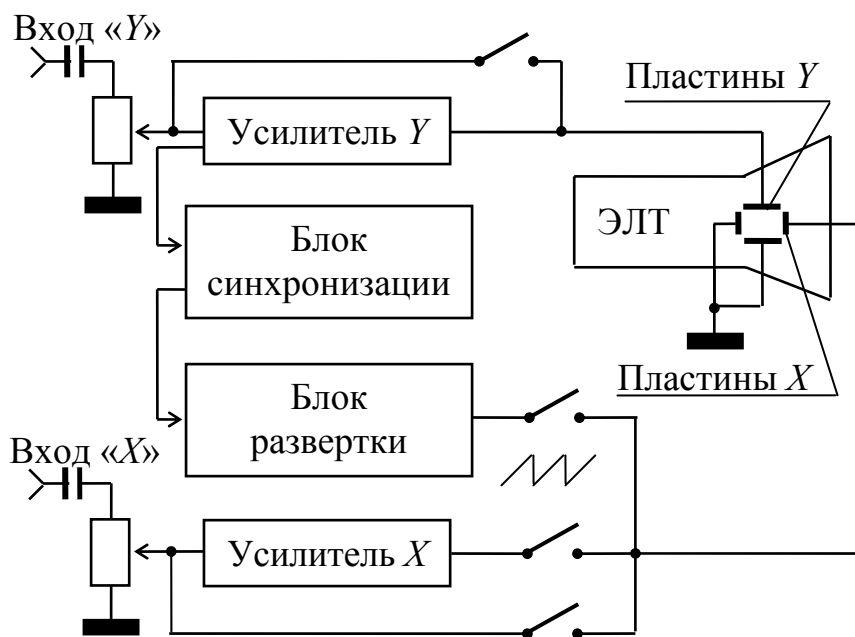


Рис. 19

3. Порядок выполнения работы и обработка результатов измерений

Задание 1. Изучение приемов работы с осциллографом.

1. Зарисуйте переднюю панель прибора и ознакомьтесь с назначением ручек управления осциллографа (используя инструкцию в приложении к установке).

2. Подготовьте осциллограф к работе согласно инструкции. Подключите генератор синусоидальных сигналов и осциллограф к сети. После прогрева приборов (в течение 15 мин), вращая соответствующие ручки на панели осциллографа (\prec и \odot), получите четкое, но не яркое изображение горизонтальной линии. Если на экране наблюдается «бегущая» светящаяся точка, то следует переключатель «Время/дел» повернуть вправо настолько, чтобы наблюдалась сплошная горизонтальная линия.

3. Подсоедините вход Y осциллографа с помощью кабеля к разъему генератора сигналов. Задайте частоту сигнала в интервале $(1-2) \cdot 10^3$ Гц.

4. Ознакомьтесь с действием органов управления осциллографа, выполнив следующие операции:

4.1. Установите переключатель «Время/дел» в положение, при котором наблюдается несколько периодов исследуемого сигнала.

4.2. Опробуйте действие ручек на передней панели осциллографа:

– ручек « \updownarrow » и « \leftrightarrow », которые перемещают изображение сигнала по экрану;

– ручек «Яркость» (\odot) и «Фокус» (*), которыми задаются яркость и фокусировка изображения;

– ручки «В/дел» для ступенчатой регулировки усиления сигнала (размера изображения сигнала по вертикали);

– ручки «Время/дел» для ступенчатой регулировки длительности развертки (сигнал должен «растягиваться» или «сжиматься» по горизонтали);

– ручки «Уровень», которая регулирует синхронизацию (позволяет установить неподвижное изображение);

– ручек «Плавно», которыми плавно регулируется усиление сигнала и длительность развертки.

Задание 2. Наблюдение электрических сигналов и измерение их параметров.

1. Подготовьте табл. 10 для занесения результатов измерений.

Таблица 10

Форма сигнала, частота сигнала	δ_x , «В/дел»	l_y ,	U_0 ,	δ_x , «Время/дел»	l_x ,	T ,	v ,	t_1 ,
--------------------------------	-------------------------	---------	---------	-----------------------------	---------	-------	-------	---------

--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

2. Для получения синусоидального сигнала установите частоту генератора в интервале 500–1000 Гц, а ручку регулятора выходного напряжения (см. инструкцию в приложении) в среднее положение. Установите переключатель «V/дел» так, чтобы изображение сигнала на экране по вертикали занимало 4–6 больших делений (клеток). (В случае необходимости размер изображения сигнала можно изменить, используя ручку регулятора выходного напряжения генератора). Значение «V/дел» запишите в таблицу. Вращая ручку «Уровень», добейтесь устойчивого изображения синусоидального сигнала. Установите переключатель «Время/дел» в положение, при котором наблюдается несколько периодов исследуемого сигнала. Значение шкалы «Время/дел» запишите в таблицу. Зарисуйте полученный на экране сигнал.

3. Определите амплитуду U_0 сигнала, выполнив следующие операции:

3.1. С помощью ручки « \updownarrow » совместите нижнюю границу изображения синусоиды с одной из нижних линий сетки, при этом верхняя граница синусоиды должна находиться в пределах экрана.

3.2. Ручкой « \leftrightarrow » сместите изображение по горизонтали таким образом, чтобы один из максимумов синусоиды находился на центральной вертикальной оси шкалы экрана.

3.3. Измерьте расстояние l_y по вертикали (в больших и малых делениях) между крайними точками размаха изображения сигнала (ручка «Плавно» должна быть в положении \blacktriangledown). Умножьте измеренное расстояние на показания переключателя «V/дел», полученный результат будет равен удвоенному значению амплитуды ($2U_0$).

4. Определите период T колебаний сигнала, выполнив следующие операции:

4.1. С помощью ручки « \updownarrow » переместите изображение таким образом, чтобы две характерные точки сигнала, ограничивающие один период колебаний, находились на центральной горизонтальной оси шкалы экрана.

4.2. Ручкой « \leftrightarrow » поместите изображение так, чтобы левая из выбранных точек совпала с одной из вертикальных линий сетки экрана.

4.3. Определите расстояние l_x в больших и малых делениях сетки экрана между двумя выбранными точками изображения сигнала (ручка «Плавно» должна быть в положении \blacktriangledown).

4.4. Умножив это расстояние на показание переключателя «Время/дел», найдите период сигнала T (если используется растяжка длительности развертки, то полученный результат умножьте на 0,1). По формуле $\nu = 1/T$ определите частоту сигнала.

Таким же способом можно измерять время нарастания (спада) сигналов и длительность сигнала между любыми двумя его точками.

5. Включите генератор прямоугольных и пилообразных сигналов. Для получения прямоугольного сигнала, тумблер генератора переведите в положение « \square ». Установите переключатель «V/дел» так, чтобы изображение сигнала на экране занимало 4–6 больших делений (клеток). Значение «V/дел» запишите в таблицу. Вращая ручку «Уровень», добейтесь устойчивого изображения прямоугольного сигнала. Установите переключатель «Время/дел» в положение, при котором наблюдается несколько периодов исследуемого сигнала. Значение «Время/дел» запишите в таблицу. Зарисуйте полученный на экране сигнал. Определите амплитуду, период и частоту этого сигнала, повторив п. 3–4.

6. Для получения пилообразного сигнала подключите вход Y осциллографа к гнездам «Исходный сигнал» генератора сигналов и нажмите клавишу «1 кГц». Установите переключатель «V/дел» так, чтобы изображение сигнала на экране занимало 4–6 больших делений (клеток). Значение «V/дел» запишите в таблицу. Вращая ручку «Уровень», добейтесь устойчивого изображения пилообразного сигнала. Установите переключатель «Время/дел» в положение, при котором наблюдается несколько периодов исследуемого сигнала. Значение «Время/дел» запишите в таблицу. Зарисуйте полученный на экране сигнал. Определите амплитуду, период, время нарастания и частоту этого сигнала, повторив п. 3–4 этого задания.

МАГНЕТИЗМ

Лабораторная работа № 46

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УДЕЛЬНОГО ЗАРЯДА ЭЛЕКТРОНА

Цель работы: изучить движение электронов во взаимно-перпендикулярных электрическом и магнитном полях; освоить методику определения удельного заряда (e/m) электрона *методом магнетрона*.

1. Теоретическое введение

Пользуясь конспектом и рекомендуемой литературой, изучите теоретический материал темы и изложите письменно ответы на следующие вопросы (изложение должно содержать текст, формулы, рисунки).

1. Электрическая и магнитная силы, действующие на заряд q в электрическом и магнитном полях (сила Лоренца).
2. Уравнение движения заряженной частицы в скрещенных ($\vec{E} \perp \vec{B}$) электрическом и магнитном полях.
3. Влияние направления начальной скорости \vec{v}_0 на вид траектории движения электрона в магнитном поле ($\vec{v}_0 \perp \vec{B}$, $\vec{v}_0 \parallel \vec{B}$, $0 < (\vec{v}_0, \vec{B}) < 90^\circ$).
4. Теоремы (законы) об изменении момента импульса и кинетической энергии частицы.

2. Описание установки и метода измерений

Удельным зарядом частицы называется отношение ее заряда q к массе m . Существующие методы определения удельного заряда микрочастиц основаны на изучении закономерностей их движения в электрических и магнитных полях.

Для измерения отношения заряда электрона e к его массе m_e в данной работе используется метод *магнетрона**. Магнетрон представляет собой двухэлектродную лампу (диод) с цилиндрическим катодом К и коаксиальным с ним цилиндрическим анодом А (рис. 20, а). Лампа помещена в однородное постоянное магнитное поле, вектор индукции которого \vec{B} совпадает с осью симметрии электродов. Катод нагревается нитью накала и испускает электроны, т. е. возникает явление

* Магнетрон – генератор электромагнитных волн СВЧ-диапазона ($\nu \sim 10^9 - 10^{11}$ Гц).

ние термоэлектронной эмиссии. Если на анод подать положительный относительно катода потенциал, то в пространстве между электродами возникнет неоднородное электрическое поле. Это поле радиальное (катод и анод лампы образуют цилиндрический конденсатор), и его напряженность

$$E_r = -\frac{U_a}{\ln(b/a)} \cdot \frac{1}{r},$$

где U_a – анодное напряжение; b – радиус анода; a – радиус катода; r – расстояние от оси до некоторой точки межэлектродного пространства. Электрическая сила $\vec{F}_e = -e\vec{E}$, действующая на электрон в таком поле, направлена вдоль радиуса (от катода к аноду)

$$\vec{F}_e = -e\vec{E}_r.$$

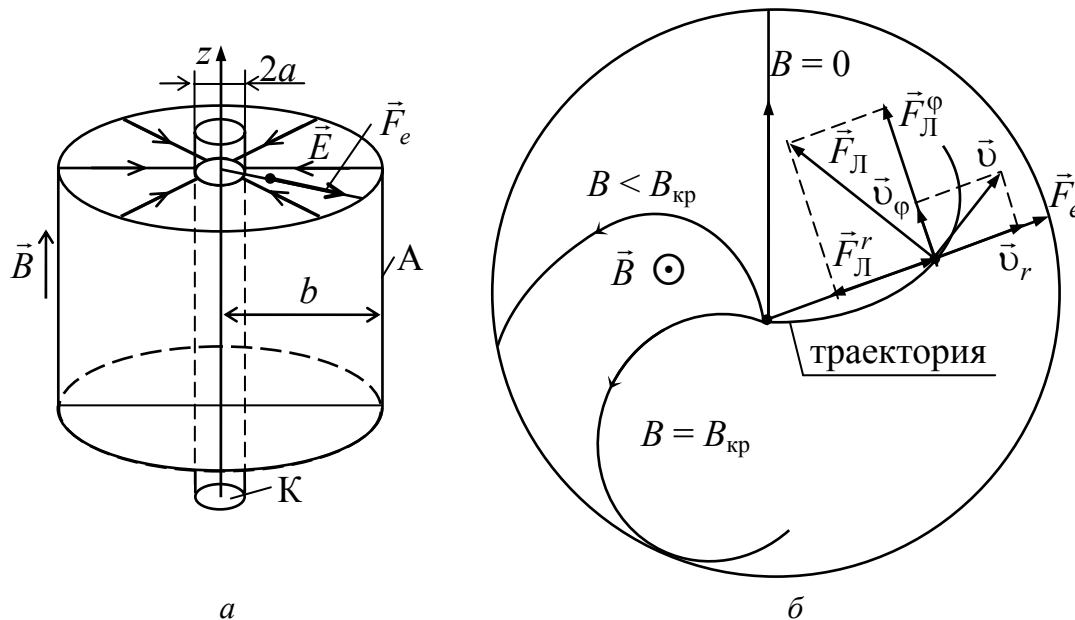


Рис. 20

Таким образом, электроны, испускаемые нагретым катодом, под действием только электрического поля двигаются к аноду вдоль радиальных линий (рис. 20, б; $B = 0$, на рисунке показано поперечное сечение магнетрона).

На электрон, движущийся в магнитном поле, действует сила Лоренца \vec{F}_L , искривляющая траекторию его движения. Величина и направление этой силы определяются формулой

$$\vec{F}_L = -e\vec{v} \times \vec{B}.$$

Так как сила Лоренца перпендикулярна вектору скорости \vec{v} электрона и вектору индукции \vec{B} магнитного поля, то векторы \vec{F}_e и $\vec{F}_Л$ лежат в одной плоскости, перпендикулярной оси магнетрона. Поэтому электроны в магнетроне будут двигаться по плоским кривым изменяющегося радиуса кривизны, зависящего от скорости движения электронов. В слабом поле кривизна траекторий мала и все носители заряда достигают поверхности анода (рис. 20, б; $B < B_{кр}$). В связи с этим ток в анодной цепи лампы останется тем же, что и при $B = 0$, если $U_a = \text{const}$. По мере увеличения магнитного поля траектории электронов все больше искривляются, и при некоторых значениях $B = B_{кр}$ они только касаются поверхности анода. Вследствие этого анодный ток уменьшается скачком до нуля (*критический режим работы магнетрона*).

Для вывода расчетной формулы, определяющей удельный заряд электрона, воспользуемся законом изменения момента импульса электрона ($\vec{l}_0 = m\vec{v} \times \vec{r}$), записав его в проекции на ось z , совпадающую с осью радиального электрического поля (рис. 20, б):

$$\frac{dl_z}{dt} = M_z(\vec{F}_e) + M_z(\vec{F}_Л). \quad (30)$$

Вектор скорости \vec{v} электрона разложим на радиальную \vec{v}_r и азимутальную \vec{v}_ϕ составляющие в полярной системе координат. Поскольку вектор \vec{v}_r пересекает ось z , то $l_z = mv_\phi r$ (r – плечо составляющей $m\vec{v}_\phi$ импульса электрона).

Электрическое поле радиальное (сила \vec{F}_e пересекает ось z), поэтому ее момент относительно оси z равен нулю ($M_z(\vec{F}_e) = 0$).

Сила Лоренца $\vec{F}_Л = -e\vec{v} \times \vec{B}$ в полярной системе координат также раскладывается на две составляющие, направление которых определяем по правилу векторного произведения (правило левой руки):

$$\vec{F}_Л = -e(\vec{v}_r + \vec{v}_\phi) \times \vec{B} = -e\vec{v}_r \times \vec{B} - e\vec{v}_\phi \times \vec{B}.$$

Радиальная составляющая $\vec{F}_Л^r = -e\vec{v}_\phi \times \vec{B}$ пересекает ось z , и ее момент равен нулю. Модуль азимутальной составляющей $\vec{F}_Л^\phi = -e\vec{v}_r \times \vec{B}$ равен $e v_r \cdot B$ ($\vec{v}_r, \vec{B} = 90^\circ$), поэтому ее момент

$$M_z(\vec{F}_\perp^\Phi) = -|\vec{F}_\perp^\Phi| \cdot r = -e v_r B r.$$

Подставив полученные выражения в уравнение (30), запишем дифференциальное уравнение движения электрона в магнетроне ($v_r = dr/dt$):

$$\frac{d(mr v_\varphi)}{dt} = e B r v_r \Rightarrow \frac{d(r v_\varphi)}{dt} = \frac{e}{2m} B \frac{d(r^2)}{dt} \Rightarrow d(r v_\varphi) = \frac{e}{2m} B d(r^2).$$

После интегрирования получим

$$r v_\varphi = \frac{e}{2m} B r^2 + C.$$

Предполагая, что начальная скорость электрона, вылетающего из катода, равна нулю ($\vec{v}_0 = 0 \Rightarrow \vec{v}_{0\varphi} = 0, \vec{v}_{0r} = 0$ при $r = a$), найдем постоянную интегрирования ($C = -e B a^2 / (2m)$) и рассчитаем азимутальную проекцию скорости вблизи анода ($r \approx b$):

$$r v_\varphi = \frac{e}{2m} B (r^2 - a^2) \Rightarrow v_\varphi(b) = \frac{e B}{2m} b \left(1 - \frac{a^2}{b^2} \right). \quad (31)$$

Поскольку работа силы Лоренца при движении электрона равна нулю ($\vec{F}_\perp \perp \vec{v}$), то на основании закона изменения кинетической энергии запишем уравнение, из которого определим радиальную проекцию скорости электрона вблизи анода:

$$\frac{m(v_r^2(b) + v_\varphi^2(b))}{2} = e U_a \Rightarrow v_r(b) = \sqrt{\frac{2e}{m} U_a - v_\varphi^2(b)}.$$

С учетом выражения (31) получим

$$v_r(b) = \sqrt{\frac{2e}{m} U_a - \left(\frac{e B}{2m} b \right)^2 \left(1 - \frac{a^2}{b^2} \right)^2}. \quad (32)$$

При критическом значении индукции B анодный ток исчезает, следовательно, проекция $v_r(b)$ равна нулю (траектория электрона соприкасается с поверхностью анода). Приравнявая выражение (32) к нулю, получим расчетную формулу для удельного заряда ($a \ll b$):

$$\frac{e}{m} = \frac{8U_a}{b^2 B_{кр}^2 (1 - a^2/b^2)^2} \square \frac{8U_a}{b^2 B_{кр}^2}. \quad (32a)$$

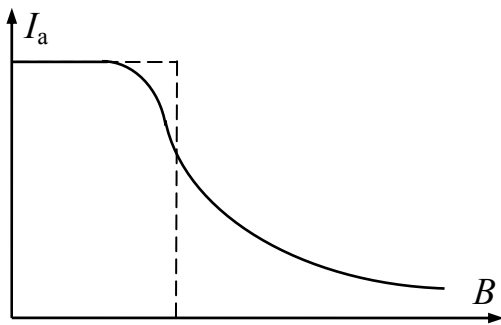


Рис. 21

Если бы начальная скорость электронов, испускаемых нагретым катодом, была равна нулю, а электроды лампы были строго коаксиальными, то зависимость $I_a = I_a(B)$ при заданном U_a (так называемая *сбросовая характеристика*) имела бы вид, показанный на рис. 21 пунктирной линией. В действительности термоэлектроны обладают различ-

ными начальными скоростями. Вследствие этого критические условия для разных электронов реализуются при разных значениях индукции B , что приводит к сглаживанию сбросовой характеристики. На рис. 21 экспериментальная сбросовая характеристика схематично изображена сплошной линией. На этом графике участок наиболее резкого уменьшения анодного тока соответствует критическим условиям работы магнетрона.

Электрическая схема установки приведена на рис. 22. На электроды электронной лампы с коаксиальной конструкцией анода и катода подается напряжение U_a от источника питания. Это напряжение регулируется реостатом R и измеряется вольтметром V , а анодный ток измеряется миллиамперметром mA .

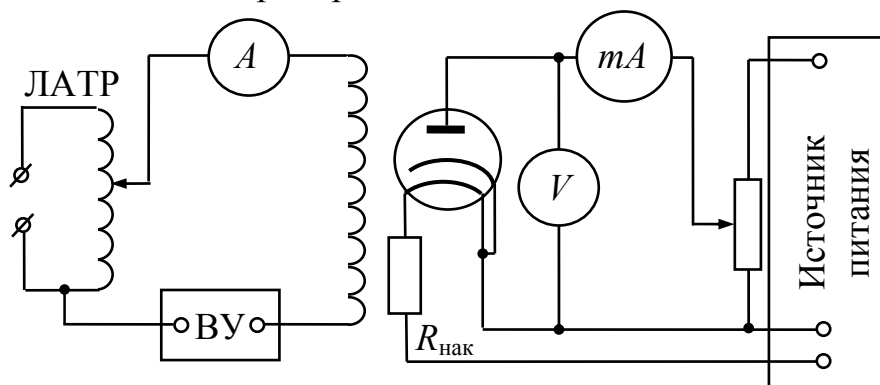


Рис. 22

Источником термоэмиссионных электронов в лампе является нить накала, расположенная внутри катода. Напряжение накала $U_{нак}$ подается от понижающей обмотки трансформатора источника питания.

Лампа располагается внутри соленоида так, что ось симметрии лампы совпадает с осью соленоида. Цепь соленоида питается от лабораторного автотрансформатора (ЛАТРа) через выпрямляющее устройство ВУ. Сила I_c тока в цепи соленоида, определяющая значение индукции B магнитного поля $B = \mu_0 \mu n I_c = k I_c$, измеряется амперметром A .

Значения параметров k , b и диапазона изменения U_a указаны на установке.

3. Порядок выполнения работы и обработки результатов

1. Подготовьте табл. 11 для занесения результатов измерений.

Таблица 11

$k =$		$b =$				$< U_a <$	
i	$I_c,$	$U_{a1},$		$U_{a2},$		$U_{a3},$	
		$I_a,$	$ \Delta I_a ,$	$I_a,$	$ \Delta I_a ,$	$I_a,$	$ \Delta I_a ,$

2. Значения параметров k , b и диапазона изменения U_a занесите в табл. 11. По схеме на установке ознакомьтесь с расположением входящих в ее состав приборов и устройств.

3. Движок реостата R поставьте в среднее положение, а указатель ЛАТРа установите на ноль. Определите цену деления шкал вольтметра, амперметра и миллиамперметра. После разрешения преподавателя или лаборанта включите установку в сеть.

4. Перемещая движок реостата, выставьте по вольтметру первое анодное напряжение U_{a1} лампы из заданного диапазона. Значение U_a при выполнении 3-го пункта поддерживайте неизменным.

5. Изменяя рукояткой ЛАТРа силу I_c тока в цепи соленоида от 0 до 0,9 А через каждые 0,05 А, запишите в табл. 11 соответствующие показания миллиамперметра для силы I_a анодного тока.

6. Выполните такие же измерения при двух других значениях анодного напряжения U_{a2} и U_{a3} (из заданного диапазона).

7. Используя данные измерений, постройте три графика зависимостей силы I_a анодного тока лампы от силы I_c тока в цепи соленоида ($I_a = f_1(I_c)$), т. е. сбросовые характеристики лампы ($B \sim I_c$).

8. Выполните численное дифференцирование сбросовых характеристик. Для этого определите разности двух соседних значений силы I_a тока ($\Delta I_a = I_i - I_{i+1}$) и занесите их в таблицу напротив соответствующих значений I_{ci} . Постройте графики зависимости $\Delta I_a = f_2(I_c)$ для трех опытов.

9. Из построенных графиков определите значение $I_c^{кр}$, соответствующее максимальному значению ΔI_a , и вычислите значение $B_{кр}$ по формуле $B_{кр} = \mu_0 n I_c^{кр} = k I_c^{кр}$.

10. По формуле (32а) рассчитайте удельный заряд электрона для каждого опыта. Найдите его среднее значение, сравните со справочным.

Лабораторная работа № 47

ИССЛЕДОВАНИЕ КРИВОЙ НАМАГНИЧИВАНИЯ ФЕРРОМАГНЕТИКА

Цель работы: получить экспериментальную кривую намагничивания; изучить зависимость магнитной индукции B , магнитной проницаемости μ и намагниченности \vec{J} исследуемого образца от напряженности магнитного поля; изучить принцип работы *баллистического гальванометра*.

1. Теоретическое введение

Пользуясь конспектом и рекомендуемой литературой, изучите теоретический материал темы и изложите письменно ответы на следующие вопросы (изложение должно содержать текст, формулы, рисунки).

1. Краткая характеристика диа-, пара- и ферромагнетиков.
2. Связь индукции \vec{B} , намагниченности \vec{J} с напряженностью \vec{H} магнитного поля.
3. Физический смысл намагниченности \vec{J} и магнитной проницаемости μ .
4. Кривая намагничивания ферромагнетика. Процесс намагничивания ферромагнетика. Петля гистерезиса и ее параметры (остаточная намагниченность, коэрцитивная сила).
5. Формулы для расчета индукции B и напряженности H магнитного поля в тороиде и соленоиде.
6. Принцип действия баллистического гальванометра (прибора для измерения заряда q , который прошел по измерительной цепи при протекании в ней кратковременного (импульсного) тока).

2. Описание установки и метода измерений

В настоящей работе для получения кривой намагничивания применяется *баллистический гальванометр* БГ. Схема установки представлена на рис. 23. Рамка I гальванометра укреплена на массивном цилиндре и помещена между полюсами постоянного магнита 2.

С помощью тумблера K_2 к гальванометру подключаются последовательно соединенные катушки 3 и 4. Катушка 3 *индуктивно** связана с соленоидом 5 и используется для градуировки шкалы гальванометра (индукция в соленоиде определяется по формуле $B_c = \mu_0 n_c I_c$, где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнитная постоянная; n_c – число витков на единицу длины обмотки соленоида; I_c – ток в обмотке). Обмотка катушки 4 намотана на тороидальном сердечнике 6 из ферромагнитного материала, индукцию B_x в котором следует определить. Калибровочный соленоид 5 или намагничивающая катушка 7 на сердечнике 6 подключаются к источнику питания тумблером K_1 . При быстром переключении тока перекидным переключателем ПК в обмотках катушек 3 и 4 наводится ЭДС индукции за счет магнитной связи соответственно с обмоткой соленоида 5 или с намагничивающей обмоткой 7. Сила тока I в первичной цепи измеряется амперметром A , а регулируется реостатами R_1 и R_2 .

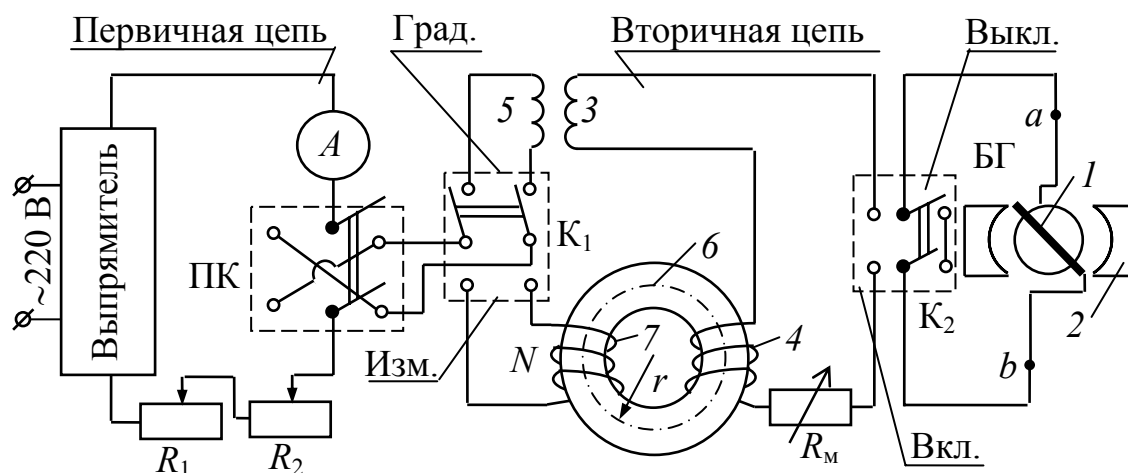


Рис. 23

При протекании кратковременного (импульсного) тока во вторичной цепи рамка I с зеркальцем светового указателя поворачивается под действием поля магнита и начинает совершать колебания. Период колебаний зависит от момента инерции рамки и коэффициента упругости пружины гальванометра. Если длительность τ импульса тока много меньше периода колебаний, то амплитуда отклонения I светового указателя («зайчика») на шкале БГ пропорциональна величине заряда q , прошедшего через БГ, т. е.

* Термин «индуктивно связанная катушка» означает, что ее витки намотаны поверх обмотки соленоида 5.

$$l = C_T q, \quad (33)$$

где C_T – баллистическая постоянная гальванометра.

С другой стороны, величина q заряда пропорциональна изменению магнитного потока $\Delta\Phi_m$, пронизывающего витки катушек 3 или 4. Это следует из решения уравнения для вторичной цепи с гальванометром. Для его составления применим 2-е правило Кирхгофа:

$$IR = E_{ин} + E_c \Rightarrow -\frac{d\Phi}{dt} - L \frac{dI}{dt} = \frac{dq}{dt} \Rightarrow d\Phi = -LdI + Rdq, \quad (34)$$

где $E_{ин} = -d\Phi_m/dt$; Φ_m – поток, пронизывающий витки катушек 3 или 4; $E_c = -LdI/dt$ – ЭДС самоиндукции во вторичной цепи с индуктивностью L ; R – суммарное омическое сопротивление обмоток, рамки гальванометра и добавочного сопротивления магазина.

Интегрируя (34) и используя условие $I(0) = I(\tau) = 0$, получим $q = |\Delta\Phi|/R$.

При изменении переключателем ПК направления тока в первичной цепи с соленоидом (тумблер K_1 находится в положении «Градуировка») на противоположное полный магнитный поток изменится на $\Delta\Phi_m = 2N_3 B_c S_c = 2N_3 \mu_0 n_c I_c S_c$, поэтому заряд $q = 2N_3 \mu_0 n_c I_c S_c / R$, где S_c – площадь поперечного сечения соленоида; N_3 – число витков в катушке 3).

Приняв во внимание последнее выражение, соотношение (33) для амплитуды отклонения l_c указателя гальванометра при градуировке можно переписать в виде:

$$l_c = C_T 2N_3 B_c S_c / R \Rightarrow l_c = C_T 2N_3 \mu_0 n_c I_c S_c / R, \quad (35)$$

При выполнении измерений с тороидом (переключатель K_1 в положении «Измерение») амплитуда отклонения l_x рассчитывается аналогично, т. е.

$$l_x = C_T 2N_4 \frac{B_x S_T}{R}, \quad (36)$$

где B_x – индукция в сердечнике тороида; S_T – площадь его поперечного сечения; N_4 – число витков в катушке 4.

Из соотношений (35) и (36) следует выражение для расчета индукции B_x :

$$B_x = \frac{B_c l_x}{l_c} \frac{S_c}{S_T} \frac{N_3}{N_4} = \mu_0 n_c \frac{S_c}{S_T} \left(\frac{I_c}{l_c} \right) \cdot \left(\frac{N_3}{N_4} \right) \cdot l_x. \quad (37)$$

Изменяя реостатом R_1 силу I_n тока намагничивания, можно менять индукцию в сердечнике, а следовательно, и напряженность намагничивающего поля ($B_x = \mu_0 \mu H$). Намагниченность J и магнитная проницаемость μ определяются по следующим формулам:

$$J = (B_x / \mu_0) - H; \quad \mu = B_x / \mu_0 H. \quad (37a)$$

Исследуемый образец из отожженной мягкой стали имеет форму тора сечением S_r и радиусом осевой линии r . На него намотана намагничивавшая обмотка с числом витков N . При малом радиусе сечения тора по сравнению с радиусом самого тора магнитное поле внутри обмотки является близким к однородному. Если сила тока в намагничивающей обмотке I_n , то напряженность поля внутри обмотки тороида:

$$H = I_n N / 2\pi r, \quad (38)$$

где r – средний радиус тороида.

Значения $n_c, S_c, S_r, R, N_3, N_4, N$ указаны на установке.

3. Порядок выполнения работы и обработка результатов измерений

Задание 1. Градуйровка шкалы гальванометра.

1. Подготовьте табл. 12 для занесения результатов измерений.

Таблица 12

i	$I_c,$	$I_c,$	$I_c / I_c,$	$(I_c / I_c)_{cp},$

2. По схеме на установке ознакомьтесь с расположением приборов, реостатов, магазина сопротивлений и переключателей, входящих в состав установки. Определите цену деления амперметра на всех диапазонах измерения.

3. Движки реостатов R_1 и R_2 полностью введите. Тумблер K_2 переведите в положение «Выкл.» (при этом рамка гальванометра будет замкнута накоротко). С разрешения преподавателя подключите выпрямитель и осветитель гальванометра к сети.

4. На магазине добавочных сопротивлений выставьте значение R_m , указанное на установке. Значение R_m в процессе измерений по заданиям 1 и 2 менять не допускается. Переключатель K_1 поставьте в положение «Град.». Замкните переключатель ПК и установите в соленоиде силу тока $I_c = 0,6$ А.

5. Переведите переключатель K_2 , в положение «Вкл.» и установите световой указатель на нулевое деление шкалы, перемещая махо-

вичком шкалу гальванометра. После этого быстро переведите перекидной переключатель ПК в другое положение и определите величину максимального смещения l_c светового указателя в миллиметрах шкалы. Результат запишите в табл. 12.

6. Выполните еще три аналогичных измерения при значениях силы тока 0,5 А, 0,4 А и 0,3 А. Перед каждым измерением гальванометр выключайте тумблером K_2 (положение «Выкл.»). По окончании измерений реостаты R_1 и R_2 полностью введите. Переключатель K_2 поставьте в положение «Выкл.».

7. Вычислите средние значения отношения (I_c/l_c) гальванометра.

Задание 2. Получение кривых намагничивания ферромагнетика.

1. Подготовьте табл. 13 для занесения результатов измерений.

Таблица 13

$r =$	$N =$	$N_3 =$	$N_4 =$	$n_c =$	$S_c =$	$S_T =$
i	$I_n,$	$I_x,$	$B_x,$	$H,$	$J,$	μ

2. Разомкните переключателем ПК первичную цепь. Переключатель K_1 поставьте в положение «Изм.».

3. Устанавливая реостатами R_1 и R_2 в цепи намагничивающей обмотки тороида значения тока I_n , указанные на установке, определите смещение светового указателя гальванометра l_x для каждого значения тока. Для получения устойчивой намагниченности образца перед каждым измерением изменяйте переключателем ПК направление тока несколько раз. Результаты занесите в табл. 13.

4. По формулам (37), (37а) и (38) вычислите значения B , J , μ и H при каждом значении силы тока. Результаты расчетов занесите в табл. 13.

5. Постройте графики зависимостей $B(H)$, $J(H)$ и $\mu(H)$.

Лабораторная работа № 48

ИЗУЧЕНИЕ МАГНИТНОГО ГИСТЕРЕЗИСА С ПОМОЩЬЮ ОСЦИЛЛОГРАФА

Цель работы: Освоить осциллографический метод исследования намагничивания ферромагнетика; построить основную кривую намагничивания, определить коэрцитивную силу H_k и остаточную индукцию $B_{ост}$ ферромагнетика осциллографическим методом.

1. Теоретическое введение

Пользуясь конспектом и рекомендуемой литературой, изучите тео-

ретический материал темы и изложите письменно ответы на следующие вопросы (изложение должно содержать текст, формулы, рисунки).

1. Краткая характеристика диа-, пара- и ферромагнетиков.
2. Связь индукции \vec{B} , намагниченности \vec{J} с напряженностью \vec{H} магнитного поля.
3. Физический смысл намагниченности \vec{J} и магнитной проницаемости μ .
4. Кривая намагничивания ферромагнетика. Процесс намагничивания ферромагнетика. Петля гистерезиса и ее параметры (остаточная намагниченность, коэрцитивная сила).
5. Формулы для расчета индукции B и напряженности H магнитного поля в тороиде и соленоиде.
6. Магнитный гистерезис. Коэрцитивная сила H_k и остаточная индукция $B_{\text{ост}}$.
7. Магнитно-жесткие и магнитно-мягкие ферромагнитные материалы.

2. Описание метода измерений и установки

Принципиальная схема установки для определения параметров петли гистерезиса осциллографическим методом приведена на рис. 24. Переменное напряжение частотой 50 Гц подается от ЛАТРа.

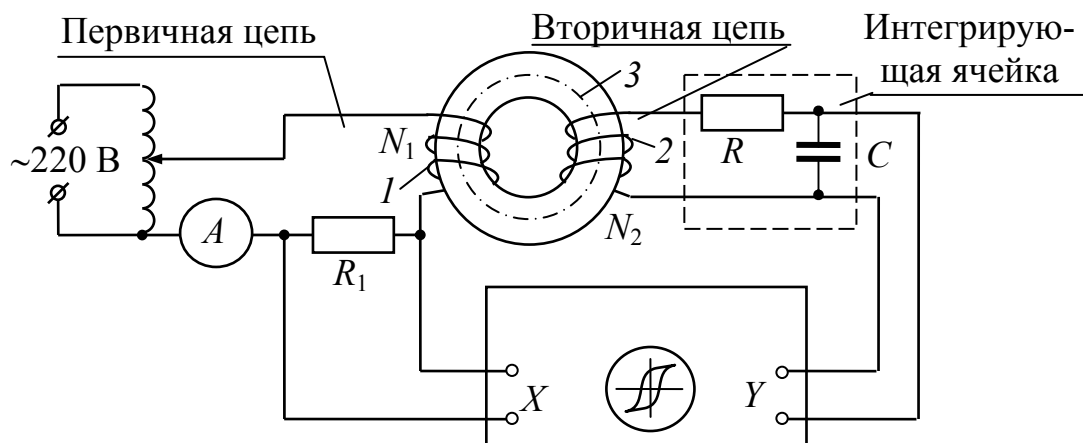


Рис. 24

Намагничивающая 1 и измерительная 2 обмотки намотаны на образец изучаемого ферромагнетика, который выполнен в виде тороида 3. Число витков в обмотках равно соответственно N_1 и N_2 . Чтобы на экране осциллографа можно было наблюдать петлю гистерезиса ($B = f(H)$), необходимо на вход X подать напряжение, которое пропор-

ционально напряженности H намагничивающей катушки 1 , а на вход Y – напряжение, пропорциональное индукции B в тороиде 3 . Если витки тороидальной катушки 3 уложены равномерно, то напряженность магнитного поля этой катушки со средним радиусом a и числом витков на единицу длины $n = N_1/(2\pi a)$ равна $H = nI_1 = I_1 N_1/(2\pi a)$, где N_1 – полное число витков обмотки 1 . С помощью закона Ома выразим силу I_1 тока в первичной цепи через падение напряжения U_1 , которое снимается с активного сопротивления R_1 и подается на вход X . Тогда получим

$$H = \frac{N_1 I_1}{2\pi a} = \frac{N_1 U_1}{2\pi a R_1} \Rightarrow U_1 = \frac{2\pi a R_1}{N_1} H. \quad (39)$$

Таким образом, горизонтальная развертка луча осциллографа осуществляется напряжением $U_1(t)$, которое пропорционально мгновенному значению напряженности $H(t)$ намагничивающего поля в сердечнике.

В соответствии с законом Фарадея – Ленца, в измерительной обмотке 2 возникает ЭДС индукции, которая пропорциональна скорости изменения магнитного потока $\Phi_m = BS$, т. е.

$$\mathcal{E}_2 = -N_2 (d\Phi_m/dt) = -N_2 S (dB/dt), \quad (40)$$

где S – площадь поперечного сечения тороидального сердечника; N_2 – полное число витков в обмотке 2 .

Для получения напряжения, которое пропорционально индукции B , во вторичную цепь включена интегрирующая RC -ячейка. Ее параметры подбираются таким образом, чтобы напряжение на активном сопротивлении R ($U_R = I_2 R$) было много больше, чем ЭДС самоиндукции в катушке 2 ($\mathcal{E}_c = -L dI_2/dt$) и напряжение U_C на конденсаторе ($U_C = q/C$). Тогда с помощью 2-го правила Кирхгофа для вторичной цепи получается приближенное уравнение, которое с учетом выражения (40) определяет силу I_2 тока во вторичной цепи:

$$\mathcal{E}_2 \approx I_2 R \Rightarrow I_2 = \frac{\mathcal{E}_2}{R} = -\frac{N_2 S}{R} \frac{dB}{dt}. \quad (41)$$

Напряжение на конденсаторе

$$U_C = \frac{q}{C} = \frac{1}{C} \int I_2(t) dt = -\frac{N_2 S}{RC} \int dB(t) = -\frac{N_2 S}{RC} B, \quad (41a)$$

которое пропорционально индукции B , подается на вход Y осциллографа.

Из формул (39) и (41а) выразим напряженность магнитного поля и абсолютное значение магнитной индукции в сердечнике тороида:

$$H = \frac{N_1}{2\pi r R_1} U_1; \quad B = \frac{RC}{N_2 S} U_C. \quad (42)$$

Значения напряжений U_1 и U_C определяются по размахам X и Y отклонений луча на экране осциллографа (рис. 25), т. е.

$$U_1 = 0,5\delta_X \cdot X; \quad (43)$$

$$U_C = 0,5\delta_Y \cdot Y, \quad (44)$$

где δ_X и δ_Y — чувствительности горизонтального и вертикального отклонения осциллографа; X и Y — число больших или малых делений на шкалах экрана, соответствующее размаху луча по осям OX или OY в обе стороны, т. е. вершинам A_1 и A_2 петли.

Для построения основной кривой намагничивания нужно определить координаты точек вершин петли для разных значений напряженности H , т. е. разных значений силы I тока в первичной цепи. Для определения коэрцитивной силы H_K и остаточной индукции $B_{ост}$ надо определить координаты точек пересечения петли гистерезиса с горизонтальной (A_3) и вертикальной (A_4) осями сетки на экране осциллографа. Значения параметров, необходимых для расчетов, указаны в приложении к установке. Значения R и C устанавливаются на магазине сопротивлений и емкостей в процессе выполнения работы. Значение δ_Y определяется по положению указателя на переключателе чувствительности («В/дел»), расположенному на передней панели осциллографа. Значение δ_X указано на установке.

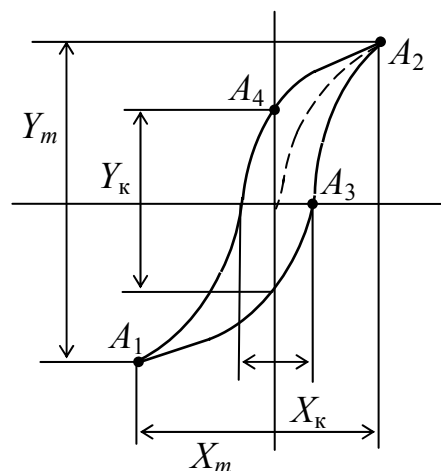


Рис. 25

3. Порядок выполнения работы и обработка результатов измерений

1. Подготовьте табл. 14 для занесения результатов измерений.

Таблица 14

$N_1 =$		$N_2 =$		$S =$		$a =$		$R =$		$C =$	
i	$I,$	$X_k,$	$Y_k,$	$X_m,$	$Y_m,$	$\delta_x,$	$\delta_y,$	$H_k,$	$B_{ост},$	$H_m,$	$B_m,$

2. По приложению к установке ознакомьтесь с расположением элементов управления на передней панели осциллографа. Определите цену деления амперметра на всех диапазонах измерения. Переключателем на амперметре установите диапазон, обеспечивающий измерение тока 1 А.

3. Включите осциллограф. Регуляторами на передней панели выведите световую точку в центр экрана.

4. Рукоятку ЛАТРа установите в положение «0». С разрешения преподавателя или лаборанта включите установку в сеть.

5. Установите ЛАТРо́м ток в обмотке тороида $I = 0,6$ А. Получите максимальное изображение петли гистерезиса в пределах экрана осциллографа, манипулируя ручкой «В/дел» осциллографа и изменяя величину сопротивления R и емкости C на магазинах сопротивлений и емкостей. Запишите эти значения в верхнюю графу таблицы (значения R и C подберите, ориентируясь по внешнему виду петли из диапазона 8–9,5 кОм и 0,4–0,8 мкФ соответственно). Сцентрируйте петлю относительно начала координатной сетки на экране осциллографа. Снова выставьте рукоятку ЛАТРа в исходное положение (ток равен нулю).

6. Поворотом рукоятки ЛАТРа установите по амперметру ток 0,1 А и запишите координаты точек пересечения петли гистерезиса с осями координат X_k, Y_k и вершин петли X_m, Y_m в делениях шкалы экрана (рис. 25).

7. Повторите эти измерения, меняя ток с интервалом 0,05 А до 0,6 А. Результаты занесите в таблицу.

8. По формулам (42), (43) и (44) вычислите значения коэрцитивной силы H_k , остаточной индукции $B_{ост}$, значения напряженности H_m и индукции B_m в вершинах петли для каждого значения силы тока.

9. Постройте основную кривую намагничивания $B_m(H_m)$.

10. Определите значения H_k и $B_{ост}$ при максимальном значении тока в намагничивающей обмотке. Определите класс ферромагнетика.

Лабораторная работа № 49

ИЗУЧЕНИЕ ЯВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ

Цель работы: изучить явление электромагнитной индукции; экспериментально установить влияние на ЭДС индукции числа витков и введенного сердечника, амплитуды и частоты переменного поля.

1. Теоретическое введение

Пользуясь конспектом и рекомендуемой литературой, изучите теоретический материал темы и изложите письменно ответы на следующие вопросы (изложение должно содержать текст, формулы, рисунки).

1. Закон Био – Савара – Лапласа (для магнитной индукции элемента тока).
2. Определение циркуляции и потока вектора магнитной индукции.
3. Явление электромагнитной индукции. Закон Фарадея – Ленца. Правило Ленца.
4. Механизмы возникновения ЭДС индукции: 1) в контуре с перемещающейся перемычкой; 2) в неподвижном контуре, находящемся в переменном магнитном поле).
5. Явление самоиндукции. ЭДС самоиндукции.
6. Определение потокосцепления самоиндукции и индуктивности контура (соленоида).

2. Описание установки и метода измерений

Схемы установок для изучения явлений электромагнитной индукции и самоиндукции представлены на рис. 26, 27. В состав установки входят генератор синусоидального напряжения $U = U_0 \sin \omega t$, трансформатор тока Тр, цилиндрические соленоиды L_1 и L_2 , миллиамперметр mA и вольтметр V . Поверх многослойной первичной обмотки соленоида L_1 намотаны девять секций вторичной обмотки соленоида L_2 с выводами 1, 2, ..., 10, что обеспечивает их индуктивную связь. Частоту ν и амплитуду I_0 силы тока в первичной цепи можно изменять соответствующими ручками на лицевой панели Ге-

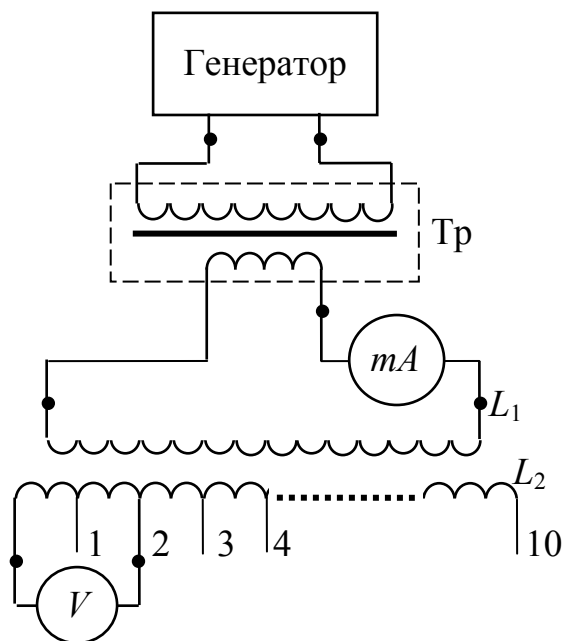


Рис. 26

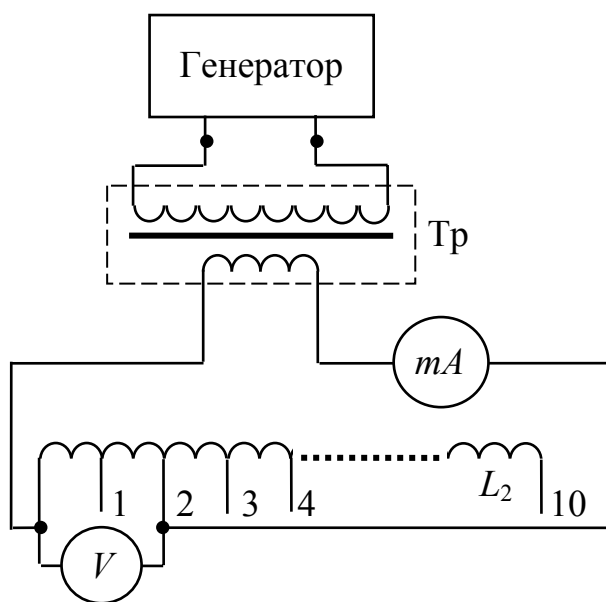


Рис. 27

нератора. По обмотке соленоида

L_1 протекает переменный ток $I_1 = I_0 \sin \omega t$, который возбуждает

в соленоиде L_1 переменное магнитное поле, изменяющееся во времени по гармоническому закону $B_1 = \mu_0 \mu n_1 I_1$. Это магнитное поле создает изменяющийся во времени магнитный поток через поперечное сечение соленоида L_1 , который в соответствии с законом Фарадея – Ленца индуцирует ЭДС во вторичной обмотке L_2 . Зна-

чение	ЭДС	индукции	на	выво-
дах	секций	обмотки	L_2	измеря-
ется	вольтметром		V .	Каждая
секция		вторичной		обмотки
имеет	N_2	= 100	витков,	кото-

рые намотаны в одну сторону, за исключением последней (девятой), витки которой намотаны в противоположном направлении. Действующее значение ЭДС, измеряемое вольтметром во вторичной цепи, зависит от количества секций K (числа витков KN_2), магнитной проницаемости μ материала сердечника в соленоиде L_1 , действующего значения $I_d = I_0 / \sqrt{2}$ силы переменного тока, протекающего по обмотке соленоида L_1 и его частоты ν (формулу, которая устанавливает эту зависимость, получите самостоятельно).

Из закона Фарадея – Ленца следует, что действующее значение ЭДС индукции во вторичной обмотке пропорционально амплитудному значению потока магнитной индукции \vec{B} через поперечное сечение соленоида L_2 . Поэтому отношение ЭДС индукции E_2^c на выводах обмоток в соленоиде L_2 с сердечником к ЭДС на тех же выводах без сердечника E_2^B равно

$$\frac{E_2^c}{E_2^B} = \frac{\Phi_0^c}{\Phi_0^B} = \frac{B_0^c S_c + B_0^B (S_B - S_c)}{B_0^B S_B}, \quad (45)$$

где B_0^c и B_0^B – амплитудные значения магнитной индукции в поперечных сечениях сердечника площадью S_c и воздушного пространства соленоида площадью S_B ($S_B - S_c$ – площадь поперечного сечения воздушного пространства в соленоиде с сердечником).

Учитывая, что $B_0^c = \mu B_0^B$, последнее соотношение можно переписать в виде

$$\frac{E_2^c}{E_2^B} = 1 + (\mu - 1) \frac{S_c}{S_B}, \quad (45a)$$

где μ – магнитная проницаемость сердечника, для воздуха $\mu \approx 1$.

Из уравнения (45a) следует расчетная формула для экспериментального измерения магнитной проницаемости сердечника:

$$\mu = 1 + \left(\frac{E^c}{E^B} - 1 \right) \frac{S_B}{S_c}. \quad (46)$$

Формула (46) получена без учета *эффекта размагничивания*, обусловленного конечностью размеров сердечника, помещенного в магнитное поле соленоида.

3. Порядок выполнения работы и обработки результатов измерений

Задание 1. Изучение зависимости ЭДС индукции от числа витков во вторичной обмотке соленоида L_2 . Определение магнитной проницаемости образца (сердечника), внесенного в магнитное поле соленоида.

1. Подготовьте табл. 15 для занесения результатов измерений.

Таблица 15

$d_c =$		$d_B =$		$v =$	$I_d =$
Число секций	Без сердечника			С сердечником	
	Число витков KN_2 ,	E ,		Число витков KN_2 ,	E ,

2. Измерьте диаметры сердечника (d_c) и воздушного соленоида L_2 (d_B) и занесите их значения в таблицу.

3. По инструкции в приложении к установке ознакомьтесь с расположением элементов управления генератора и порядком его включения.

4. Соберите цепь согласно рис. 25. Включите генератор в сеть.

5. В соответствии с Вашим номером n звена в подгруппе по шкале генератора установите частоту $\nu = 100 \div 100 n$ (Гц) в диапазоне 100–1000 Гц. Ручкой регулятора напряжения генератора установите по миллиамперметру действующее значение I_d силы тока в диапазоне 20–40 мА и поддерживайте ее неизменной в процессе измерений. Значения ν и I_d занесите в табл. 15.

6. Подключите вольтметр V к выводам 0–1 (первая секция вторичной обмотки соленоида L_2) и занесите в таблицу действующее значение ЭДС первой секции обмотки.

7. Последовательно подключая один провод (правый) к выводам остальных секций, измерьте их ЭДС. Занесите данные в табл. 15.

8. Вставьте в соленоид L_1 железный сердечник и выполните аналогичные измерения при тех же значениях частоты ν и I_d тока.

9. Постройте графики зависимости $E = f_1(KN_2)$. Вычислите магнитную проницаемость сердечника μ по формуле (46).

Задание 2. Изучение зависимости ЭДС индукции от действующего значения I_d силы (амплитуды) переменного тока в первичной обмотке соленоида L_1 и его частоты ν .

1. Подготовьте табл. 16 для занесения результатов измерений.

Таблица 16

i	$\nu = \text{const} =$		$I_d = \text{const} =$	
	$I_d,$	$E,$	$\nu,$	$E,$

2. В собранной цепи подключите вольтметр V к двум центральным секциям катушки L_2 , расположенным примерно на середине (например, к клеммам 4 и 6). Удалите из соленоида сердечник.

3. По шкале генератора установите частоту $\nu = 300 + 50 n$ (Гц) и занесите ее значение в табл. 16. Изменяя действующее значение силы тока в первичной цепи от 10 до 50 мА, занесите значение E в табл. 16.

4. Установите по миллиамперметру действующее значение силы тока в диапазоне 20–40 мА и следите за тем, чтобы ее величина не изменилась в процессе измерений. Изменяя частоту ν генератора в интервале от 100 до 1000 Гц (через 100 Гц), занесите в табл. 16 значение E .

5. Постройте графики зависимостей $\mathcal{E} = f_2(I_d)$ при $\nu = \text{const}$ и $\mathcal{E} = f_3(\nu)$ при $I_d = \text{const}$.

Задание 3. Изучение зависимости ЭДС самоиндукции от действующего значения I_d силы переменного тока в соленоиде L_2 , частоты ν тока и числа витков.

1. Подготовьте табл. 17 для занесения результатов измерений.

Таблица 17

i	$\nu = \text{const} = 1 \text{ кГц}$		$I_d = \text{const} =$		$\nu = \text{const} = 1 \text{ кГц}$	
	$I_d,$	$\mathcal{E}_c,$	$\nu,$	$\mathcal{E}_c,$	$N,$	$\mathcal{E}_c,$

2. Соберите цепь согласно рис. 27, для этого к выходу генератора подключите первую секцию обмотки соленоида L_2 .

3. Установите по шкале генератора частоту 1 кГц. Изменяя силу I_d тока в цепи в интервале 0–100 мА с шагом 10 мА, занесите в табл. 17 показания вольтметра.

4. Установите силу I_d тока в цепи 20–40 мА (следите за тем, чтобы ее величина не изменялась в процессе измерений). Изменяя частоту ν генератора в диапазоне 500–1000 Гц, занесите в табл. 17 показания вольтметра, которые равны ЭДС самоиндукции \mathcal{E}_c .

5. Установите частоту $\nu = 1000$ Гц и силу I_d тока в диапазоне 20–40 мА, которую поддерживайте неизменной. Увеличивая число секций катушки, подсоединяемых к выходу генератора, занесите в табл. 17 показания вольтметра, которые равны ЭДС самоиндукции \mathcal{E}_c .

6. Постройте графики зависимостей $\mathcal{E}_c = f(I_d)$, $\mathcal{E}_c = f(\nu)$ и $\mathcal{E}_c = f(N)$.

Лабораторная работа № 50

ИЗУЧЕНИЕ СВОБОДНЫХ ЗАТУХАЮЩИХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ КОЛЕБАНИЙ

Цель работы: с помощью осциллографа проверить выполнение экспоненциального закона убывания амплитуды затухающих колебаний тока в контуре; изучить зависимость *логарифмического декремента* δ затухания от активного сопротивления R колебательного контура.

1. Теоретическое введение

Пользуясь конспектом и рекомендуемой литературой, изучите теоретический материал темы и изложите письменно ответы на следующие вопросы (изложение должно содержать текст, формулы, рисунки).

1. Применение 2-го правила Кирхгофа для составления дифференциального уравнения затухающих электрических колебаний в контуре и его решение для заряда ($q = q(t)$) и силы тока ($I = I(t)$).

2. Соотношения между параметрами колебаний (ω_0 – собственная частота, β – коэффициент затухания, ω – частота затухающих колебаний, δ – логарифмический коэффициент затухания) и параметрами C , L и R колебательного контура.

3. Зависимости электрической и магнитной энергии контура от времени. Диссипация энергии контура.

4. Критическое сопротивление R контура, при котором колебательный разряд конденсатора становится апериодическим ($\omega \rightarrow 0$ или $T \rightarrow \infty$). Формула для расчета критического сопротивления.

2. Описание установки и метода измерений

Схема установки изображена на рис. 28.

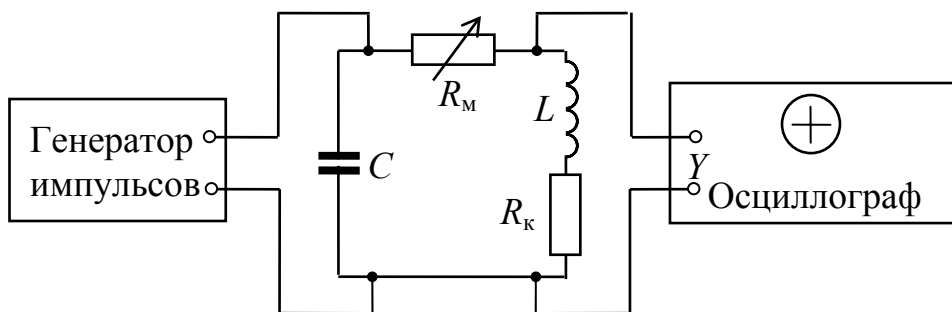


Рис. 28

Колебательный контур установки состоит из катушки индуктивности L , конденсатора C и магазина сопротивлений R_M . Конденсатор C заряжается под воздействием периодических импульсов напряжения, которые вырабатываются генератором. В промежутках между этими импульсами в контуре происходят свободные колебания. Затухание колебаний определяется в основном потерями энергии в собственном сопротивлении R_K катушки индуктивности и в сопротивлении R_M , так как шунтирующее влияние самого генератора на подключенную к нему цепь невелико. Возбуждаемые в контуре колебания напряжения подаются на вход Y электронного осциллографа. Генератор развертки осциллографа синхронизируется пере-

менным напряжением, частота которого совпадает с частотой ν повторения импульсов. Поэтому изображение на экране осциллографа всех отдельных затухающих колебаний накладываются друг на друга и воспринимаются глазом в виде одной неподвижной кривой (рис. 29). Временные и амплитудные параметры колебаний определяются по шкале на экране осциллографа. В качестве дополнительного сопротивления используется магазин сопротивлений.

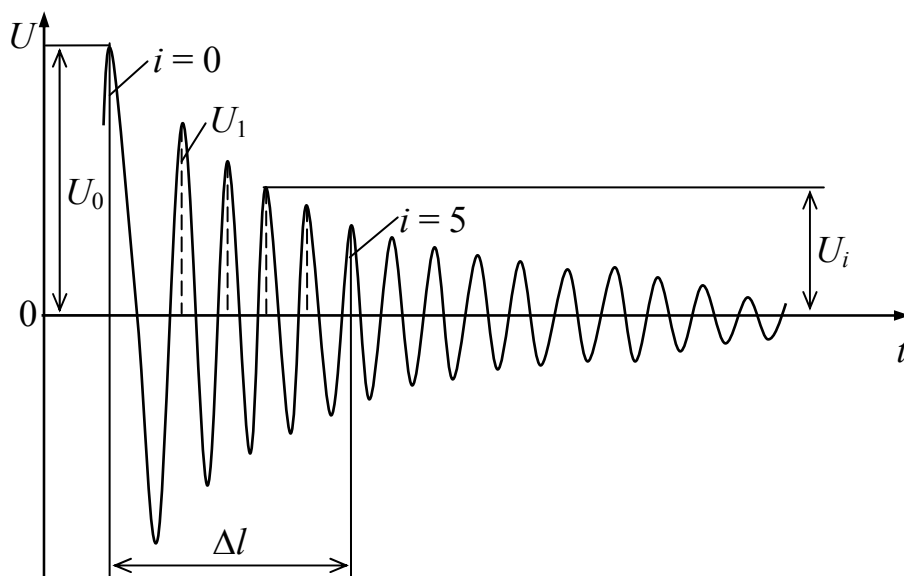


Рис. 29

3. Порядок выполнения работы и обработки результатов измерений

1. Подготовьте табл. 18 для занесения результатов измерений.

Таблица 18

$R_k =$		$N =$		$\delta_x =$		$\delta_y =$	
i	$U_i,$	$\ln (U_0/U_n),$	$T,$	$\beta,$	$\delta,$	$L,$	$C,$

2. По инструкции в приложении к установке ознакомьтесь с расположением элементов управления генератора и порядком его включения. После проверки собранной цепи преподавателем или лаборантом подключите приборы к сети.

3. Соберите цепь согласно рис. 28. Установите на магазине сопротивлений $R_m = 0$ (в контуре будет действовать только активное сопротивление R_k катушки индуктивности).

4. Сфокусируйте электронный луч. Получите на экране осциллографа неподвижное изображение цуга затухающих колебаний. Рукояткой «Время/дел» и «В/дел» осциллографа отрегулируйте изображение так, чтобы размер его стал максимальным, а на экране наблюдалось 7–8 периодов колебаний.

5. По горизонтальной шкале экрана (рис. 29) измерьте длину Δl для N полных колебаний (в малых делениях) и, используя значение масштаба развертки δ_x , определите период T ($T = \Delta l \delta_x / N$) и занесите его в табл. 18.

6. По вертикальной шкале экрана измерьте высоту следующих друг за другом амплитуд U_i колебаний (в малых делениях). Отсчет периодов начинайте с амплитуды U_0 , для которой $i = 0$. Результаты измерений занесите в табл. 18.

7. Выставьте на магазине сопротивлений $R_m = 100$ Ом (если номер звена нечетный) и $R_m = 200$ Ом (если номер звена четный) и выполните пункты 3–6.

8. Для двух значений сопротивления $R = R_k + R_m$ постройте графики зависимостей: $\ln(U_0/U_i)$ от момента времени $t = iT$, соответствующего i -й амплитуде. С помощью графиков определите коэффициенты затухания β , которые равны угловым коэффициентам линейной зависимости $\ln(U_0/U_i) = iT\beta$.

9. Определите логарифмический декремент затухания $\delta = \beta T$.

10. Для двух выполненных опытов рассчитайте индуктивность L и емкость C колебательного контура, используя следующие формулы: $\beta = R/2L$; $\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \beta^2}$, $\omega_0 = 1/(\sqrt{LC})$, $\omega = 2\pi/T$.

11. Определите средние значения индуктивности (L_{cp}) и емкости (C_{cp}) колебательного контура.

Лабораторная работа № 51

ПРОВЕРКА ЗАКОНА ОМА ДЛЯ ЦЕПИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Цель работы: опытным путем проверить выполнение закона Ома для амплитудных или действующих значений напряжения $U(t)$ и силы $I(t)$ синусоидального переменного тока; определить значения R , L и C для цепи с последовательным соединением резистора, соленоида, конденсатора и источника постоянного или переменного тока.

1. Теоретическое введение

Пользуясь конспектом и рекомендуемой литературой, изучите теоретический материал темы и изложите письменно ответы на следующие вопросы (изложение должно содержать текст, формулы, рисунки).

1. Применение 2-го правила Кирхгофа для составления дифференциального уравнения для силы тока в цепи с последовательно соединенными элементами (R , L и C) и его решение для вынужденных колебаний.

2. Вывод выражения закона Ома для цепи переменного тока (с помощью *метода векторной диаграммы* либо аналитически).

3. Индуктивное, емкостное и полное сопротивление для синусоидального переменного тока в CLR -цепочке.

4. Сдвиг фаз между напряжениями и силой тока на участке цепи с последовательно включенными R , L , C .

5. Действующее значение силы тока и напряжения.

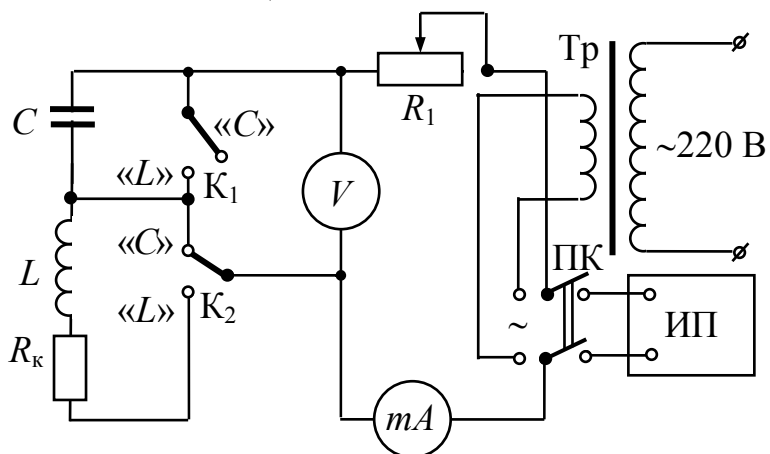


Рис. 30

2. Описание установки и метода измерений

Схема установки представлена на рис. 30. Электрическая цепь состоит из конденсатора с емкостью C , катушки с неизвестными индуктивностью L с собственным активным сопротивлением R_k , миллиамперметра mA и реостата R_1 , которые соединены последовательно.

Напряжение		элементы		напряжения	
на		элементы		цепи	
измеряется				вольт-	
метром	V ,	а	сила	I	
тока	в	цепи	—	мил-	
лиамперметром				mA .	
Ток	в	цепи		регулиру-	
руется		реостатом		R_1 .	
На эту	цепь	подается	постоянное	напря-	
жение		от	источника		

постоянного напряжения ИП или переменное напряжение вторичной обмотки понижающего трансформатора Тр. Переключение источников питания осуществляется с помощью перекидного переключателя ПК. Первичная обмотка Тр подключена к сети, поэтому частота переменного тока $\nu = 50$ Гц (циклическая частота $\omega = 2\pi\nu = 314$ с⁻¹). При подключении источника ИП вольтметр и миллиамперметр mA измеряют соответственно постоянные значения напряжения U и силы I тока. На постоянном токе в цепи с катушкой индуктивности действует только омическое сопротивление R_k ее обмотки. На переменном токе вольтметр V с помощью тумблеров K_1 и K_2 можно поочередно подключать к катушке, конденсатору или к цепи из последовательно соединенных катушки и конденсатора. Показания вольтметра V и миллиамперметра mA на переменном токе являются действующими значениями напряжения и силы тока, U_d и I_d . Исключение конденсатора из цепи обеспечивается переводом тумблера K_1 в положение «L», в результате конденсатор «закорачивается».

3. Порядок выполнения работы

Задание 1. Измерение сопротивления R_k и индуктивности L катушки.

1. Подготовьте табл. 19 для занесения результатов измерений.

Таблица 19

Катушка	i	На постоянном токе				На переменном токе				
		$U,$	$I,$	$R_k,$	$R_k^{cp},$	$U_d,$	$I_d,$	$Z_k,$	$Z_k^{cp},$	$L,$
Без сердечника										
С сердечником										

2. Тумблеры K_1 и K_2 поставьте в положение «L». Так будет образована цепь, состоящая из катушки с индуктивностью L и собственного сопротивления R_k ее обмотки. Движок реостата R_1 установите в среднее положение.

3. Переключателем ПК замкните цепь на источник постоянного напряжения ИП и определите цену деления вольтметра и миллиамперметра на всех диапазонах. Включите установку в сеть.

4. Для трех положений движка реостата R_1 , соответствующих наименьшему, среднему и наибольшему значениям напряжения U в цепи, определите значения силы I тока и занесите их в таблицу. Вставьте сердечник и выполните аналогичные измерения.

5. Переключателем ПК замкните цепь на источник переменного тока и запишите показания U_d и I_d при трех различных положениях движка реостата R_1 (без сердечника и с сердечником).

6. Вычислите омическое R_k и полное Z_k сопротивления катушки ($R_k = U_0/I_0$; $Z_k = U_d/I_d$). Вычислите средние значения R_k^{cp} и Z_L^{cp} , затем найдите среднее значение индуктивности L_{cp} катушки, используя формулу $Z_k = \sqrt{R_k^2 + \omega^2 L^2}$.

Задание 2. Измерение емкости C конденсатора.

1. Подготовьте табл. 20 для занесения результатов измерений.

Таблица 20

i	$U_d,$	$I_d,$	$X_C,$	$X_C^{cp},$	$C,$

2. Тумблеры K_1 и K_2 поставьте в положение «С». Нагрузкой для источника питания в цепи теперь будет только конденсатор C . Замкнув цепь с помощью переключателя ПК на источник переменного тока и изменяя сопротивление реостата, запишите измеренные значения напряжения U_d и силы тока I_d при трех разных положениях движка реостата.

3. С помощью закона Ома для цепи с конденсатором C ($I_d = U_d/X_C$) рассчитайте емкостное сопротивление X_C для трех опытов и определите их среднее значение X_C^{cp} . Вычислите емкость C , используя формулу $X_C = 1/(\omega C)$.

Задание 3. Проверка закона Ома для переменного тока.

1. Подготовьте табл. 21 для занесения результатов измерений.

Таблица 21

i	$U_d,$	$I_d,$	$Z_{эксп},$	$Z_{расч},$

2. Переключателем ПК подключите к источнику переменного напряжения цепь из последовательно соединенных конденсатора емкостью C , катушки индуктивности L (без сердечника) и активного со-

противления R_k . Для этого тумблер K_1 оставьте в положении «С», а тумблер K_2 переведите в положение «L».

3. Изменяя сопротивление R_1 реостата, выполните измерения напряжения U_d и силы тока I_d для не менее чем пяти положений движка реостата.

4. Постройте график зависимости $I = f(U)$. Убедитесь в выполнении закона Ома для цепи переменного тока (экспериментальная зависимость между действующими значениями тока и напряжения должна быть линейной). По тангенсу угла наклона зависимости $I = f(U)$ определите полное сопротивление цепи $Z_{\text{эсп}}$.

5. Используя экспериментальные данные $R_k^{\text{ср}}$, $L_{\text{ср}}$, $C_{\text{ср}}$ из заданий 1 и 2, рассчитайте полное сопротивление $Z_{\text{расч}}$ цепи и сдвиг фаз φ между током и напряжением по формулам:

$$Z_{\text{расч}} = \sqrt{\left(R_k^{\text{ср}}\right)^2 + \left(\omega L_{\text{ср}} - \frac{1}{\omega C_{\text{ср}}}\right)^2}; \quad \text{tg } \varphi = \frac{\omega L_{\text{ср}} - 1/(\omega C_{\text{ср}})}{R_k^{\text{ср}}}.$$

6. Сравните полученные значения $Z_{\text{расч}}$ и $Z_{\text{эсп}}$. Определите характер цепи (индуктивный или емкостный).

Лабораторная работа № 52

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЗОНАНСА НАПРЯЖЕНИЙ

Цель работы: изучить зависимость амплитуды силы I_0 тока от частоты ν генератора при вынужденных колебаниях в колебательном контуре с последовательным соединением конденсатора C , катушки L и резистора R (CLR -контур); определить полуширину амплитудно-частотной характеристики контура ($I_0 = I_0(\nu)$), резонансную частоту, добротность контура.

1. Теоретическое введение

Пользуясь конспектом и рекомендуемой литературой, изучите теоретический материал темы и изложите письменно ответы на следующие вопросы (изложение должно содержать текст, формулы, рисунки).

1. Электрический колебательный контур. Краткая характеристика электромагнитных колебаний, происходящих в контуре с последовательным соединением емкости C , индуктивности L и сопротивления R (CLR -контур).

2. Дифференциальное уравнение вынужденных колебаний электрического тока и его решение (с помощью метода векторной диа-

граммы либо аналитически).

3. Амплитудно-частотная характеристика CLR -контура (резонансная кривая). Явление резонанса в CLR -контуре (резонанс напряжений). Резонансная частота для амплитуды силы тока.

4. Добротность Q электрического колебательного контура. Формула для расчета добротности Q по известным полуширине полосы $\Delta\nu_0$ резонансной кривой и резонансной частоте ν_0 .

5. Действующие значения силы тока и напряжения.

2. Описание установки и метода измерений

Схема установки представлена на рис. 31. Генератор с периодически

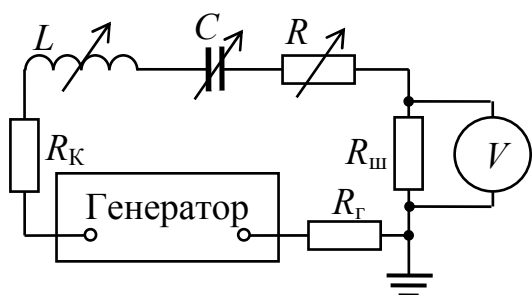


Рис. 31

ически изменяющейся ЭДС ($\mathcal{E} = \mathcal{E}_0 \cos \omega t$) соединен с магазинами индуктивностей L , емкостей C и сопротивлений R . Сила $I(t)$ тока в контуре пропорциональна напряжению $U(t)$ на шунте с сопротивлением $R_{\text{ш}}$ ($I(t) = U(t)/R_{\text{ш}}$). Действующее значение U_d этого напряжения измеряется вольтметром V . Значение частоты ν (Гц) отсчитывается по шкале на лицевой

панели генератора. Амплитуда и частота ЭДС генератора изменяются рукоятками на его лицевой панели.

При изменении частоты ν амплитуда I_0 силы тока в контуре изменяется в соответствии с резонансной кривой (рис. 32). По мере увеличения частоты ν амплитуда I_0 силы тока в цепи возрастает. Достигнув максимального значения I_0^{max} , она начинает уменьшаться. Частота, соответствующая максимальному значению амплитуды силы тока, является резонансной частотой контура, которая равна собственной частоте ν_0 , т. е.

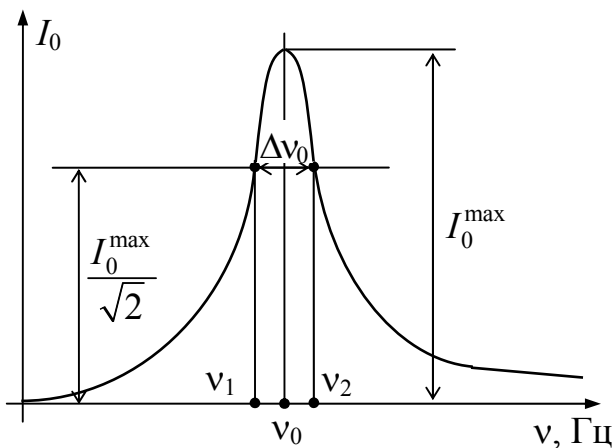


Рис. 32

$$\nu_p = \nu_0 = 1 / (2\pi\sqrt{LC}).$$

3. Порядок выполнения работы и обработка результатов измерений

1. Подготовьте табл. 22 для занесения и обработки результатов измерений.

Таблица 22

$R_r + R_k =$		$R_{ш} = 1 \text{ Ом};$		$C =$		$L =$		$\nu_{\text{расч.}} =$	
i	$R = 0 \text{ Ом}$				$R =$				
	$\nu,$	$I_d,$	$\Delta \nu_0 / \nu_0,$	$Q,$	$\nu,$	$I_d,$	$\Delta \nu_0 / \nu_0,$	$Q,$	

2. Занесите в табл. 22 значение суммарного выходного сопротивления генератора и катушки индуктивности, $R_r + R_k$, а также значения L и C , которые определите по таблице приложения к установке в соответствии с номером n Вашего звена в подгруппе.

3. Проверьте соответствие соединений приборов на установке и на схеме на рис. 31. После разрешения преподавателя или лаборанта включите генератор и вольтметр в сеть.

4. На магазинах индуктивностей и емкостей установите заданные значения L и C . На магазине сопротивлений выставьте нули.

5. Убедитесь в том, что при заданных значениях L , C и R наблюдается максимум на *резонансной кривой* зависимости $I_d = U_d / R_{ш}$ от частоты ν . Для этого ручку регулятора выходного напряжения генератора поставьте в среднее положение, затем плавно изменяйте частоту ν от наименьшего ее значения до максимально возможного. При этом напряжение на шунте $R_{ш}$, которое измеряется вольтметром V , сначала должно возрастать, а затем убывать (при $\nu > \nu_0$). Переключатель диапазонов измерений на вольтметре поставьте в такое положение, чтобы стрелка вольтметра при резонансе отклонялась примерно на 3/4 его шкалы. Определите цену делений шкал частоты ν генератора и напряжения U вольтметра.

6. После обнаружения резонанса приступайте к снятию амплитудно-частотной характеристики контура, т. е. резонансной кривой ($I_d = f(\nu)$) при $R = 0$. Выставьте на шкале генератора такую начальную частоту, чтобы показание вольтметра соответствовало нескольким малым делениям, или на начальное деление его шкалы. Увеличивая

частоту ν с некоторым шагом $\Delta\nu$, снимайте показания вольтметра U . Значения частоты ν и соответствующей ей силы тока $I_d = U_d/R_{ш}$ заносите в таблицу. При приближении к резонансной частоте шаг $\Delta\nu$ надо уменьшить так, чтобы достаточно точно определить положение пика (максимума) на резонансной кривой. Пройдя через максимум, шаг $\Delta\nu$ можно увеличить и закончить измерения, когда показания вольтметра уменьшатся до начального деления его шкалы.

7. Выставьте на магазине сопротивлений значение R , заданное в таблице приложения, в соответствии с номером звена в подгруппе. Выполните измерения по п. 5, 6.

8. По данным измерений постройте две амплитудно-частотные характеристики контура. Определите из графиков относительную полосу пропускания $\Delta\nu_0/\nu_0$ (см. рис. 32) и добротность $Q = \nu_0/\Delta\nu_0$.

9. Рассчитайте теоретические значения резонансной частоты ν_0 и добротности Q контура по формулам: $\nu_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L \cdot C}}$,

$Q = \frac{1}{R_r + R_k + R} \sqrt{\frac{L}{C}}$. Сопоставьте экспериментальные и теоретические значения и определите относительные погрешности измерений.

Лабораторная работа № 53

ИЗМЕРЕНИЕ ЕМКОСТИ КОНДЕНСАТОРОВ И ИНДУКТИВНОСТИ КАТУШЕК МОСТОВЫМ МЕТОДОМ

Цель работы: ознакомиться с принципом работы *уравновешенного моста переменного тока*; освоить методику измерения электрической емкости C и индуктивности L на синусоидальном переменном токе.

1. Теоретическое введение

Пользуясь конспектом и рекомендуемой литературой, изучите теоретический материал темы и изложите письменно ответы на следующие вопросы (изложение должно содержать текст, формулы, рисунки).

1. Применение 2-го правила Кирхгофа для составления дифференциального уравнения силы тока в цепи с последовательно соединенными элементами (CLR -цепочка).

2. Вывод выражения закона Ома для цепи переменного тока

(аналитически или с помощью *векторной диаграммы*).

3. Индуктивное, емкостное и полное сопротивления для синусоидального переменного тока в *CLR*-цепочке.

4. Сдвиг фаз между напряжением и силой тока на участке цепи с последовательно включенными R, L, C .

5. Действующие значения силы тока и напряжения.

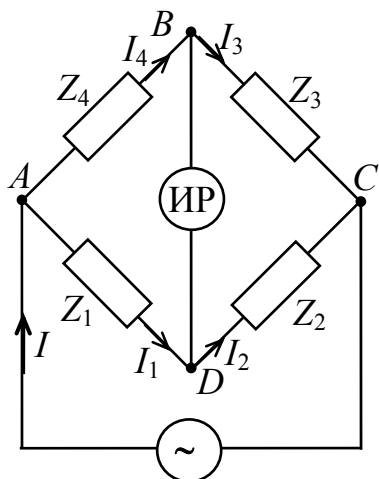
2. Описание установки и метода измерений

Индуктивность L катушек и емкость C конденсаторов проявляются при изменяющихся во времени токах и напряжениях. Одним из распространенных методов измерения этих параметров является метод *уравновешенного моста синусоидального переменного тока*^{*}, схема которого изображена на рис. 33. В качестве *индикаторов равновесия* ИР используются устройства с высоким внутренним сопротивлением, например электрометрический усилитель, электронный осциллограф и другие приборы. Каждое из четырех плеч моста в общем случае может содержать емкость C , индуктивность L и активное сопротивление R , поэтому полное сопротивление плеча рассчитывается по формуле

$$Z = \sqrt{R^2 + (\omega L - 1/(\omega C))^2}, \quad (47)$$

где ωL и $1/(\omega C)$ – *индуктивное* и *емкостное* сопротивления соответственно (ω – циклическая частота напряжения генератора). Сдвиг фаз α между напряжением $U = U_0 \cos \omega t$ и силой тока $I = I_0 \cos (\omega t + \alpha)$ в плече моста определяется по формуле

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{\omega L - (1/(\omega C))}{R}. \quad (48)$$



Рассмотрим схему моста, которая представлена на рис. 33. К точкам A и C моста подключен источник синусоидального напряжения ($U = U_0 \cos \omega t$). Обозначим через $U_{10}, U_{20}, U_{30}, U_{40}$ амплитудные значения напряжений на сопротивлениях плеч Z_1, Z_2, Z_3, Z_4 моста соответственно, $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$ и φ_4 –

^{*} Метод измерения активных сопротивлений R с помощью моста постоянного тока изложена в лабораторной работе № 34 (см. рис. 6).

разности фаз между напряжениями на сопротивлениях Z_1, Z_2, Z_3 и Z_4 и напряжением источника.

Для напряжений ветвей ADC и ABC моста справедливы следующие соотношения:

$$\begin{aligned} U_{10} \cos(\omega t + \varphi_1) + U_{20} \cos(\omega t + \varphi_2) &= U_0 \cos \omega t; \\ U_{40} \cos(\omega t + \varphi_4) + U_{30} \cos(\omega t + \varphi_3) &= U_0 \cos \omega t. \end{aligned} \quad (49)$$

При равновесии моста мгновенные значения силы тока в диагонали BD и напряжения между точками B и D должны быть равны нулю. Поэтому для уравновешенного моста мгновенные значения напряжений на сопротивлениях Z_1 и Z_4 , а также на сопротивлениях Z_2 и Z_3 попарно равны, т. е.

$$\begin{aligned} U_{10} \cos(\omega t + \varphi_1) &= U_{40} \cos(\omega t + \varphi_4); \\ U_{20} \cos(\omega t + \varphi_2) &= U_{30} \cos(\omega t + \varphi_3). \end{aligned} \quad (50)$$

Так как ток через индикатор не течет, то в любой момент времени токи через сопротивления Z_1 и Z_2 , а также через Z_3 и Z_4 должны быть попарно равны. Поэтому, согласно закону Ома ($I_0 = U_0/Z$), можно записать условия для амплитуд сил токов при равновесии моста переменного тока:

$$\begin{aligned} I_1 = I_2 &\Rightarrow \frac{U_{10}}{Z_1} \cos(\omega t + \alpha_1) = \frac{U_{20}}{Z_2} \cos(\omega t + \alpha_2); \\ I_3 = I_4 &\Rightarrow \frac{U_{30}}{Z_3} \cos(\omega t + \alpha_3) = \frac{U_{40}}{Z_4} \cos(\omega t + \alpha_4), \end{aligned} \quad (51)$$

где $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$ — разности фаз между токами и напряжениями плеч моста.

Соотношения (50), а следовательно, и соотношения (49) выполняются в любой момент времени, если

$$\varphi_1 = \varphi_4, \varphi_2 = \varphi_3; \quad U_{10} = U_{40}, U_{20} = U_{30}. \quad (52)$$

Соотношения (51) выполняются в любой момент времени, если

$$\alpha_1 = \alpha_2; \alpha_3 = \alpha_4 - \text{условия равенства сдвигов фаз сил токов}; \quad (53)$$

$$\frac{U_{10}}{Z_1} = \frac{U_{20}}{Z_2}, \frac{U_{40}}{Z_4} = \frac{U_{30}}{Z_3} - \text{условия равенства амплитуд сил токов.} \quad (53a)$$

Учитывая равенства (52) для напряжений, разделим первое уравнение (53а) на второе. Тогда получим условие для сопротивлений Z плеч уравновешенного моста.

$$\frac{Z_4}{Z_1} = \frac{Z_3}{Z_2} \Rightarrow Z_4 Z_2 = Z_1 Z_3. \quad (53б)$$

Таким образом, для уравнивания моста переменного тока (в отличие от моста постоянного тока) нужно уравнивать амплитуды и сдвиги фаз напряжений и токов.

Из условий (53) следует, что схема уравновешенного моста переменного тока существенно упрощается, если в одну из ветвей моста (например, состоящую из Z_1 и Z_2) включить два активных сопротивления (тогда условие $\alpha_1 = \alpha_2$ автоматически выполняется). Такие мосты проще по устройству и обладают большей точностью вследствие того, что образцовые резисторы можно изготовить точнее, чем конденсаторы или катушки индуктивности.

Простейшая схема моста для измерения емкости показана на рис. 34. Здесь C_x – измеряемая, а C_0 – образцовая емкости; R_1 и R_2 – образцовые активные сопротивления.

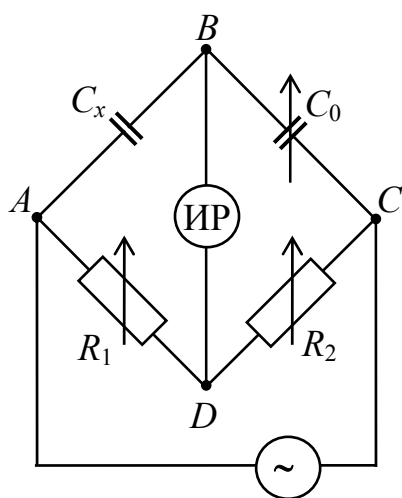


Рис. 34

Приведенная схема применима для измерения емкостей конденсаторов с пренебрежимо малыми утечками заряда с их обкладок. В этом случае условие (53б) существенно упрощается и позволяет установить связь между измеряемой емкостью и остальными параметрами моста:

$$\frac{1}{\omega C_x} \cdot R_2 = \frac{1}{\omega C_0} \cdot R_1 \Rightarrow C_x = C_0 \frac{R_2}{R_1}. \quad (54)$$

Из полученной формулы следует, что уравновесить мост можно, изменяя образцовую емкость C_0 при заданном отношении R_2/R_1 или изменяя отношение R_2/R_1

при постоянной емкости C_0 .

Схема моста для измерения индуктивности L , в котором плечом сравнения является образцовая катушка индуктивности L_0 , приведена на рис. 35. В эту цепь можно включать либо источник переменного тока, либо источник постоянного тока. Соответственно с этим в измерительную диагональ включается или индикатор равновесия ИР, или гальванометр G . С учетом формулы (47) условие (53б) можно записать в виде

$$R_1 \sqrt{r_0^2 + \omega^2 L_0^2} = R_2 \sqrt{r_x^2 + \omega^2 L_x^2}$$

(где r_0 и r_x — активные сопротивления образцовой (эталонной) и измеряемой

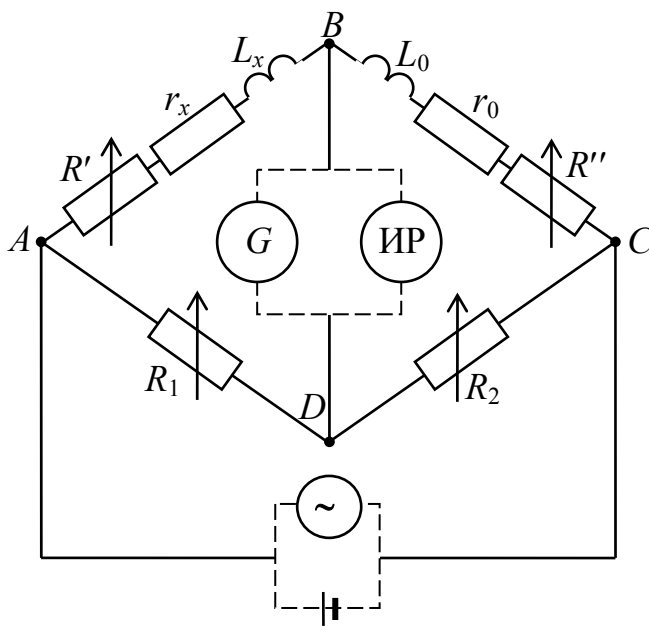


Рис. 35

катушек, $Z_3 = \sqrt{r_0^2 + \omega^2 L_0^2}$, $Z_4 = \sqrt{r_x^2 + \omega^2 L_x^2}$). Из условия равенства фаз (53) с учетом формулы (48) получим $L_x/L_0 = r_x/r_0$. Из этих двух условий следует, что $R_1/R_2 = r_x/r_0$. Условия $R_1/R_2 = r_x/r_0$ и $L_x/L_0 = r_x/r_0$ должны одновременно выполняться при измерениях индуктивностей любых катушек. Однако в общем случае такое требование невыполнимо. В самом деле, сопротивление r катушки зависит от материала, диаметра и длины провода, из которого она изготовлена, а индуктивность L катушки зависит от ее формы, материала сердечника и способа намотки. Поэтому в общем случае между указанными величинами нет пропорциональной зависимости. Это означает, что уравнивание моста переменного тока не достигается при любых значениях R_1 , R_2 , L_1 и L_2 . Чтобы уравнивание моста было возможным, в его индуктивные плечи включают переменные резисторы (магазины сопротивлений) R' и R'' . При наличии сопротивлений R' и R'' условию равновесия моста будут соответствовать соотношения

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{r_x + R'}{r_0 + R''}, \quad \frac{L_x}{L_0} = \frac{r_x + R'}{r_0 + R''}. \quad (55)$$

Поскольку сопротивления R' и R'' можно изменять в широком диапазоне, то эти два соотношения при измерениях разных индуктивностей катушек могут быть выполнены одновременно. Если измерить величину r_x на постоянном токе, а затем установить значения R' и R'' , при которых мост будет уравновешен на переменном токе, то можно по

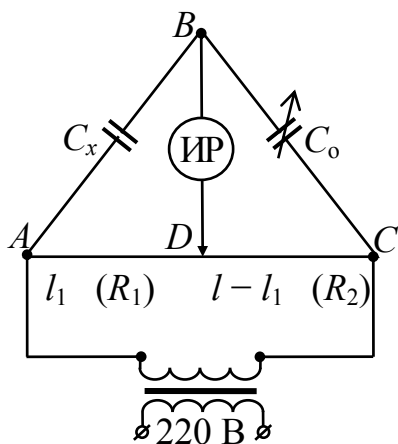


Рис. 36

формуле (55) вычислить L_x . Однако точность определения L_x таким методом ограничена, так как сопротивления R' и R'' могут обладать собственными индуктивностями, которые оказываются включенными последовательно с L_x и L_0 . Поэтому добиться абсолютно точного равновесия моста невозможно. Для повышения точности измерений индуктивности дополнительных сопротивлений R' и R'' должны быть намного меньше L_x и L_0 . Если сопротивления R_1 и R_2 также выполнить малоиндуктивными, то можно считать, что

наиболее точное равновесие моста достигается, если одновременно выполняются равенства (55). Первое из этих равенств можно достичь на постоянном токе, второе – на переменном. Наибольшая точность равновесия, соответствующая наименьшему значению напряжения между точками B и D (рис. 35) достигается, если значения отношения R_1/R_2 будут наиболее близкими при балансировке на переменном и постоянном токах.

3. Порядок выполнения работы и обработка результатов измерений

Задание 1. Измерение электроемкости конденсаторов с помощью моста Сотти.

Принципиальная схема моста Сотти представлена на рис. 36. Плечами R_1 и R_2 являются участки реохорда – калиброванной проволоки с большим удельным сопротивлением, натянутой вдоль миллиметровой шкалы. Соединение индикатора ИР с реохордом осуществляется посредством подвижного контакта. Так как сопротивление такой проволоки пропорционально ее длине l , то, согласно (54) и рис. 36, имеем

$$C_x = C_0 \frac{l - l_1}{l_1}. \quad (56)$$

В качестве образцовой емкости C_0 используется магазин емкостей, индикатором равновесия ИР является *нуль-индикатор*, показание которого пропорционально напряжению в измерительной диагонали BD моста. Переменное напряжение на реохорд моста подается от вторичной обмотки сетевого трансформатора.

1. Подготовьте табл. 23 для занесения результатов измерений.

Таблица 23

Измеряемая емкость	l_1 ,	$l - l_1$,	C_0 ,	C_x ,	$C_x^{\text{ср}}$,
C_{1x} ,					

2. Ознакомьтесь с расположением магазина емкостей, нуль-индикатора и конденсаторов, емкости которых следует определить. После проверки цепи преподавателем или лаборантом включите в сеть трансформатор и нуль-индикатор.

3. Присоедините к клеммам « C_x » на установке один из трех конденсаторов с неизвестной емкостью C_{1x} . Установите подвижный контакт D посередине реохорда.

4. Выполните балансировку моста и определите значение емкости C_0 . Для этого нажмите на клавишу «1» на передней панели нуль-индикатора. На магазине емкостей выберите такое значение образцовой емкости C_0 , чтобы показание нуль-индикатора стало наименьшим.

5. Выполните измерения по п. 4 при более высокой чувствительности нуль-индикатора (сначала при нажатой клавише «2», а затем – клавише «3») Значения l_1 и C_0 , полученные при нажатой кнопке «3», занесите в таблицу.

6. Повторите измерения по п. 4, 5, сместив контакт D реохорда сначала влево, а затем вправо на 5 см от среднего положения.

7. Выполните измерения по п. 3–6 для двух других конденсаторов с неизвестными емкостями C_{2x} и C_{3x} .

8. Выполните измерения по п. 3–6 при последовательном и параллельном соединении конденсаторов C_{1x} , C_{2x} и C_{3x} .

9. Используя данные отдельных измерений, по формуле (56) определите значения измеряемых емкостей; рассчитайте также их средние значения. Результаты измерений занесите в табл. 23.

Задание 2. Измерение индуктивности катушек.

Схема установки для измерения индуктивности катушек изображена на рис. 37.

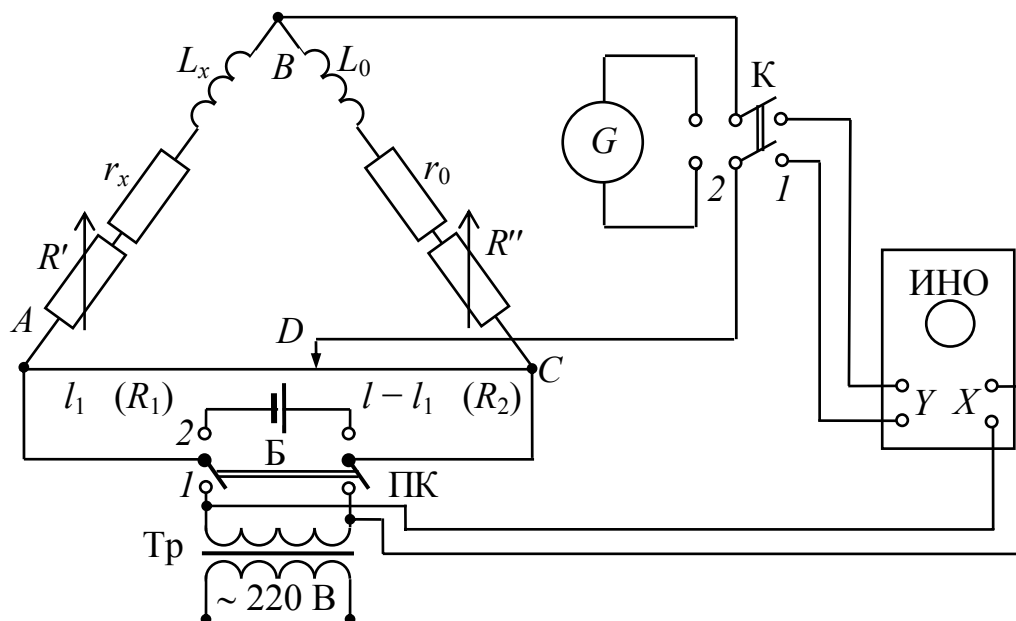


Рис. 37

Источником переменного напряжения служит вторичная обмотка понижающего трансформатора Tr , подсоединяемого к электросети. Активные сопротивления R_1 и R_2 представляют собой участки реохорда длиной l_1 и $l - l_1$, а плечом сравнения является эталонная катушка индуктивности L_0 (ее параметры см. на установке). В качестве индикатора равновесия используется *индикатор нуля осциллографический* ИНО. Принцип действия его состоит в следующем. На вертикально отклоняющие пластины электронно-лучевой трубки ЭЛТ подается разность потенциалов с измерительной диагонали, а на горизонтально отклоняющие пластины (вход X) – напряжение, питающее мост. Сигналы, подаваемые на входы X и Y , можно плавно усиливать с помощью соответствующих усилителей прибора. Если мост не уравновешен, то указанные сигналы оказываются сдвинутыми по фазе и на экране ЭЛТ наблюдается изображение эллипса. При равновесии по реактивной составляющей эллипс вытягивается в прямую наклонную линию. Когда достигается балансировка и по активной составляющей,

прямая линия занимает горизонтальное положение. Переменные резисторы R' и R'' представляют собой магазины сопротивлений с малой индуктивностью.

При работе моста на постоянном токе в цепь подключаются с помощью перекидного переключателя ПК и тумблера К батарея аккумуляторов Б и гальванометр G .

Порядок измерений следующий. Сначала устанавливают переключатель ПК и тумблер К в положение 1 и при $R' = R'' = 0$ уравнивают мост на переменном токе перемещением контакта D реохорда. Для повышения точности балансировки моста ручкой «Усиление Y » увеличивают чувствительность индикатора. При определенном значении отношения R_1/R_2 на экране ЭЛТ наблюдается изображение наклонной прямой линии. Чтобы светящаяся линия заняла горизонтальное положение, необходимо схему уравновесить точнее. Для этого подключают ее к источнику постоянного тока и, не изменяя положения движка реохорда, балансируют мост путем введения определенного сопротивления на магазине R' или R'' . Затем опять переходят на первый режим работы цепи и добиваются лучшей точности уравнивания моста, перемещая движок реохорда. Такие действия надо продолжать до тех пор, пока схема не будет уравновешена на постоянном и на переменном токах при одном и том же положении контакта D реохорда, т. е. при $(R_1/R_2)_{\text{перем}} = (R_1/R_2)_{\text{пост}}$.

Так как сопротивление реохорда пропорционально длине проволоки, то последнее выражение примет вид $l_1/(l - l_1)_{\text{перем}} = l_1/(l - l_1)_{\text{пост}}$, где l – вся длина проволоки реохорда. Тогда для уравновешенного моста, согласно соотношениям (55), получим

$$L_x = L_0 \frac{l_1}{l - l_1}; \quad (57)$$

$$r_x = l_1 \frac{r_0 + R''}{l - l_1} - R'. \quad (58)$$

1. Подготовьте табл. 24 для занесения результатов измерений.

Таблица 24

Длинный либо короткий соленоид, $l =$								
без сердечника					с сердечником			
$l_1,$	$R',$	$R'',$	$L_x,$	$r_x,$	$l_1,$	$R',$	$R'',$	$L_x,$

--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

2. Ознакомьтесь с расположением и назначением приборов и устройств установки, изучите инструкцию по использованию осциллографического индикатора нуля. Подсоедините к соответствующим

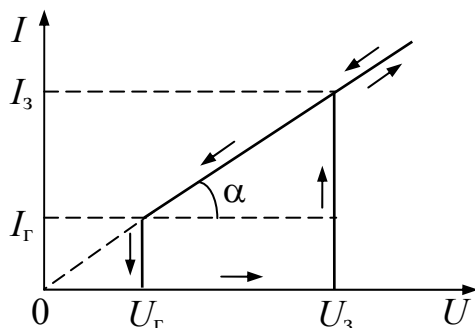


Рис. 38

клеммам цепи в качестве неизвестной индуктивности длинный соленоид (если номер звена нечетный) без сердечника или короткий соленоид (если номер звена четный) без сердечника. С разрешения преподавателя или лаборанта подключите установку к электросети.

3. Уравновесьте мост, следуя изложенной выше методике его очередной балансировки на переменном и постоянном токах. При его полной балансировке отметьте длину l_1 плеча реохорда, а также значения R' и R'' , введенные на магазинах сопротивлений, и занесите их в табл. 24.

4. Поместите в соленоид ферромагнитный сердечник и выполните все операции по уравновешиванию моста, результаты измерений занесите в таблицу.

5. Используя данные отдельных измерений, по формуле (57) рассчитайте значения измеряемых индуктивностей L_x , а по формуле (58) определите значение активного сопротивления соленоида r_x . Результаты расчетов занесите в таблицу.

6. Используя значения индуктивностей соленоида с сердечником и без него, найдите относительную магнитную проницаемость μ сердечников.

Лабораторная работа № 54

ИЗУЧЕНИЕ РЕЛАКСАЦИОННЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ

Цель работы: измерить *вольт-амперную характеристику* газоразрядной лампы; определить критическое сопротивление при возбуждении *релаксационных колебаний*; исследовать зависимость периода релаксационных колебаний от параметров генератора этих колебаний.

1. Теоретическое введение

Релаксационными колебаниями называются периодически повторяющиеся процессы сравнительно медленного накопления энергии колебательной системой и последующего быстрого ее рассеяния. Эти колебания являются одним из видов автоколебаний и могут происходить как в механических, так и в электрических системах. Электрические релаксационные колебания осуществляются с помощью различного типа генераторов. В данной работе используется простейший генератор релаксационных колебаний на газоразрядной

Зависимость силы тока I от напряжения U для газоразрядной лампы характеризуется рядом особенностей (рис. 38). Газовый промежуток лампы становится проводящим только при определенном напряжении U_3 на электродах, которое называется *напряжением зажигания* разряда в лампе. При этом напряжении электроны, которые всегда содержатся в незначительном количестве в газе (их концентрация $\sim 10^2\text{--}10^3\text{ см}^{-3}$), на длине свободного пробега приобретают под действием электрического поля кинетическую энергию $m v^2/2 = eU$, достаточную для *ударной ионизации* молекул газа.

Вследствие ионизации число носителей заряда (электронов и ионов) в газовом промежутке резко увеличивается и сила тока в лампе скачком возрастает до значения I_3 . Величина U_3 зависит от расстояния между электродами и их формы, а также от давления газа и других факторов. По мере дальнейшего увеличения напряжения сила тока возрастает по закону, близкому к линейному. Так как процесс ионизации сопровождается возбуждением атомов, то при прохождении тока через лампу наблюдается свечение газа. С понижением напряжения сила тока уменьшается также по закону, близкому к линейному. Разряд в лампе продолжает существовать и при напряжении $U < U_3$, так как при этих условиях еще поддерживается процесс генерации носителей заряда. Когда разность потенциалов на лампе становится равной U_r , разряд в лампе прекращается и сила тока в лампе падает скачком от I_r до нуля. Разность потенциалов U_r называют *напряжением гашения*. Это напряжение существенно меньше U_3 .

* В качестве газоразрядной лампы в данной лабораторной работе применяется тиратрон МТХ-90.

Рассмотрим процесс зарядки конденсатора с емкостью C от источника постоянного напряжения U_0 через резистор с сопротивлением R (рис. 39) после замыкания ключа K . Согласно второму правилу Кирхгофа, для произвольного момента времени t имеем

$$U_R(t) + U_C(t) = U_0. \quad (59)$$

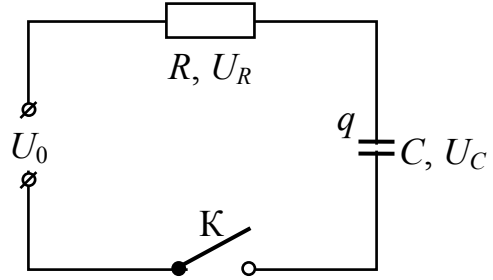


Рис. 39

Напряжение на резисторе $U_R = IR$. Сила тока $I = dq/dt = CdU_C/dt$, где q – заряд на обкладке конденсатора, а U_C – напряжение на конденсаторе. Тогда $U_R = RCdU_C/dt$ и уравнение (59) примет вид

$$RC \frac{dU_C}{dt} = U_0 - U_C \Rightarrow \frac{dU_C}{U_0 - U_C} = \frac{dt}{RC}. \quad (60)$$

Используя начальные условия ($U_C = 0$ при $t = 0$), проинтегрируем уравнение (60) в пределах от 0 до U_C и от 0 до t :

$$\int_0^{U_C} \frac{dU_C}{U_0 - U_C} = \frac{1}{RC} \int_0^t dt \Rightarrow \ln \frac{U_0 - U_C}{U_0} = -\frac{t}{RC} \Rightarrow U_C = U_0 \left(1 - e^{-\frac{t}{RC}} \right). \quad (61)$$

Из выражения (61) следует, что напряжение U_C на конденсаторе,

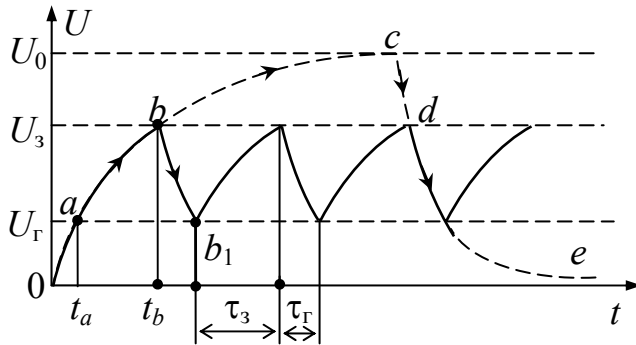


Рис. 40

увеличиваясь со временем t по экспоненциальному закону, асимптотически приближается к напряжению U_0 источника (на рис. 40 этому процессу соответствует кривая $0abc$). Причем нарастание U_C происходит тем быстрее, чем меньше величина RC ($\tau = RC$ – время релаксации напряжения U_C , его

обычно называют *постоянной времени*).

Если конденсатор зарядить до разности потенциалов U_0 , а затем замкнуть его на резистор сопротивлением R , то напряжение на нем со временем будет уменьшаться также по экспоненциальному закону (кривая cde на рис. 40).

В рассмотренную выше цепь параллельно конденсатору включим газоразрядную лампу с внутренним сопротивлением R_1 (рис. 41). Пред-

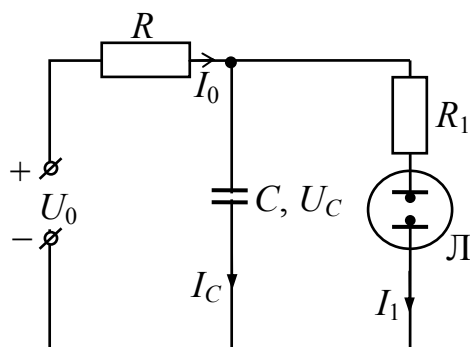


Рис. 41

положим, что конденсатор предварительно разряжен. Сопротивление лампы до момента t_3 зажигания в ней разряда очень велико, и ток через нее практически не проходит. Поэтому напряжение U_C на конденсаторе, а следовательно, и на электродах лампы будет сравнительно медленно увеличиваться согласно кривой $0b$ (рис. 40). Как только U_C станет равным напряжению зажигания U_3 лампы, ее сопротивление

резко уменьшится и начнется быстрая разрядка конденсатора (кривая bb_1). Вследствие этого напряжение на нем понижается. Когда U_C снизится до напряжения гашения U_r , ток через лампу опять перестанет проходить и конденсатор вновь начнет заряжаться. Рассмотренные процессы будут периодически повторяться. Таким образом, возникают электрические колебания, которые в данном случае представляют собой совокупность периодически повторяющихся процессов зарядки и разрядки конденсатора. Такие колебания и называются *релаксационными*. Разрядная лампа является своеобразным ключом, обеспечивающим повторяющиеся процессы накопления энергии конденсатора и ее рассеяния в разрядном промежутке лампы. В рассмотренной схеме генератора амплитуда возникающих пилообразных колебаний равна $U_3 - U_r$.

Для возникновения и поддержания релаксационных колебаний в генераторе необходимо выполнение определенных условий (*условий самовозбуждения*). Первое условие $U_0 > U_3$ является очевидным, так как при его выполнении обеспечивается зажигание разряда в лампе. Второе условие накладывает ограничение на величину сопротивления R зарядного резистора. Получим расчетную формулу для *критического зарядного сопротивления* $R_{кр}$, при котором релаксационные колебания перестают возбуждаться. Для этого рассмотрим процесс разрядки конденсатора, начиная с момента времени t_b (рис. 40).

Согласно первому правилу Кирхгофа,

$$I_0 = I_C + I_1, \quad (62)$$

где $I_C = CdU_C/dt$ – ток зарядки конденсатора; $I_1 = U_C/R_1$ – ток, протекающий через лампу; $I_0 = (U_0 - U_C)/R$ – ток источника питания.

Подставив выражения для сил токов в соотношение (62), получим дифференциальное уравнение относительно напряжения U_C :

$$\frac{U_0 - U_C}{R} = C \frac{dU_C}{dt} + \frac{U_C}{R_1}.$$

Разделив переменные и проинтегрировав это уравнение с использованием начального условия $U_C = U_3$ при $t = t_b$, получим

$$U_C = U_3 e^{-\frac{1}{C} \left(\frac{1}{R} + \frac{1}{R_1} \right) (t - t_b)} + U_0 \frac{R_1}{R_1 + R} \left[1 - e^{-\frac{1}{C} \left(\frac{1}{R} + \frac{1}{R_1} \right) (t - t_b)} \right]. \quad (63)$$

Первое слагаемое в формуле (63) описывает уменьшение напряжения на конденсаторе C в процессе его разрядки, начиная с момента времени t_b . Второе слагаемое описывает подзарядку конденсатора от источника питания по время протекания разряда в лампе. Если скорости разрядки и зарядки конденсатора одинаковы, то напряжение на конденсаторе будет постоянным, т. е. $dU_C/dt = 0$, а ток, протекающий через зарядное сопротивление R , будет равен току, протекающему через лампу, т. е. $I_0 = I_1$. Продифференцировав выражение (63) по времени и приравняв производную к нулю, получим

$$U_3 - U_0 \frac{R_1}{R + R_1} = 0 \Rightarrow R = R_{кр} = \frac{U_0 - U_3}{U_3} R_1. \quad (64)$$

Формула (64) определяет величину критического сопротивления $R_{кр}$, при котором релаксационные колебания не возбуждаются, т. е. $U_C = \text{const}$, и лампа горит непрерывно ($I_1 = I_0$). Сопротивление R_1 лампы определяется по тангенсу угла α наклона вольт-амперной характеристики $I = U/R_1$ (рис. 38):

$$\text{tg } \alpha = \frac{1}{R_1} \Rightarrow R_1 = \frac{U_3 - U_{г}}{I_3 - I_{г}}.$$

Подставив это выражение в формулу (64), получим выражение для критического зарядного сопротивления:

$$R_{кр} = \frac{(U_0 - U_3)}{U_3} \frac{(U_3 - U_{г})}{(I_3 - I_{г})}. \quad (65)$$

Величина $R > R_{кр}$ обычно выбирается достаточно большой, чтобы постоянная времени $\tau = RC$ существенно превышала характерное время разрядки τ_r конденсатора через лампу ($\tau \gg \tau_r$). Для таких условий период T релаксационных колебаний ($T = \tau_3 + \tau_r$) практически равен времени τ_{ab} зарядки конденсатора до напряжения U_3 , начиная с момента времени, при котором $U_C = U_r$ (рис. 40).

2. Описание установки и метода измерений

Выведем формулу для расчета периода T релаксационных колебаний. Для этого в выражение (61) подставим сначала напряжение $U = U_r$ и время $t = t_a$ для точки a , затем напряжение $U = U_3$ и время $t = t_b$ для точки b (рис. 40). В результате для промежутка времени $\tau_{ab} = t_b - t_a$ получим:

$$\tau_{ab} = \tau_3 \approx T = RC \ln [(U_0 - U_r)/(U_0 - U_3)]. \quad (66)$$

Схема установки изображена на рис. 42.

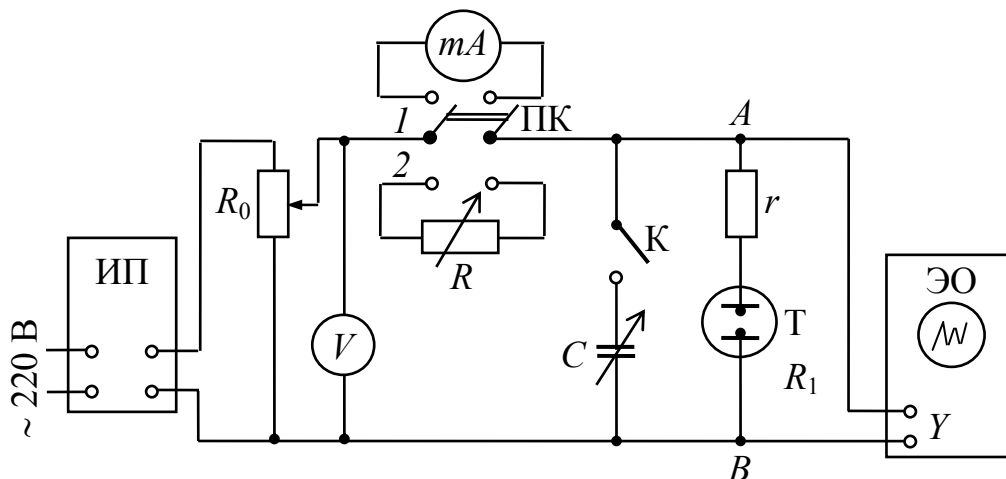


Рис. 42

В состав установки входят набор кассет ФПЭ – магазин емкостей C , магазин сопротивлений R , генератор на тиратроне T и источник питания ИП, выходное напряжение которого регулируется. Двухпозиционный переключатель ПК обеспечивает возможность включения в схему миллиамперметра mA или магазина сопротивлений R . Положение 1 переключателя используется для построения вольт-амперной характеристики тиратрона, положение 2 – для получения релаксационных колебаний. Магазин емкостей включается в цепь кнопочным переключателем K на кассете ФПЭ. Для защиты тиратрона от перегрузки по току последовательно с ним постоянно включено доба-

вочное сопротивление r . Для наблюдения релаксационных колебаний и измерения их периода используется осциллограф, на вход Y которого подается напряжение между точками A и B .

В положении 2 переключателя ПК напряжение на тиратрон T и конденсатор C подается через сопротивление магазина R . Когда напряжение на конденсаторе достигает напряжения зажигания U_3 , возникает электрический разряд в тиратроне, его сопротивление резко уменьшается и конденсатор C разряжается через тиратрон и добавочное сопротивление r . При снижении напряжения на конденсаторе до значения напряжения гашения U_{Γ} разряд в тиратроне прекращается и снова начинается процесс зарядки конденсатора. Таким образом, напряжение между точками A и B цепи периодически нарастает и спадает, т. е. в цепи возникают *релаксационные колебания*. Они обусловлены периодическими процессами зарядки и разрядки конденсатора, который осуществляется зажиганием и прерыванием разряда в тиратроне.

3. Порядок выполнения работы и обработка результатов измерений

Задание 1. Построение вольт-амперной характеристики тиратрона и определение напряжений зажигания U_3 и гашения U_{Γ} .

1. Подготовьте табл. 25 для занесения результатов измерений.

Таблица 25

i	$U,$	$I,$	$U_3,$	$U_3^{\text{ср}},$	$U_{\Gamma},$	$U_{\Gamma}^{\text{ср}},$	$I_3,$	$I_{\Gamma},$

2. По приложению к установке ознакомьтесь с расположением приборов и устройств, входящих в состав установки. С разрешения преподавателя или лаборанта включите источник питания и осциллограф в сеть.

3. Отпустив кнопку на кассете ФПЭ, включите в цепь миллиамперметр mA (отпущенная кнопка соответствует положению 1 переключателя ПК на рис. 42). Магазины емкостей C и сопротивлений R при этом отключаются.

4. Изменяя напряжение U на лампе в интервале 0–90 В, измерьте через каждые 5 В соответствующие значения силы I тока (сначала при увеличении напряжения, а затем при его уменьшении). Результаты измерений заносите в табл. 25.

5. Опыт повторите еще 2 раза.

6. По полученным данным постройте три графика зависимости $I = f_1(U)$. Из полученной зависимости определите напряжения зажигания U_3 и гашения U_{Γ} и соответствующие им силы тока I_3 и I_{Γ} .

Задание 2. Определение условий возбуждения и периода релаксационных колебаний.

1. Подготовьте табл. 26 для занесения результатов измерений.

Таблица 26

i	$U_0,$	$C,$	$R_{\text{кр}}^{\text{изм}},$	$R,$	$n,$	$t_n,$	$T_{\text{изм}},$	$T_{\text{расч}},$

2. Переключателем К на кассете ФПЭ включите в цепь магазин емкостей. Установите значение емкости $C = 0,001$ мкФ, а по вольтметру задайте напряжение $U_0 > U_3^{\text{ср}}$.

3. Определите критическое сопротивление $R_{\text{кр}}^{\text{изм}}$. Для указанного значения C подберите на магазине наименьшее сопротивление R , при котором в цепи возбуждаются релаксационные колебания. При отсутствии колебаний лампа продолжает гореть непрерывно, а пилообразные сигналы на экране осциллографа исчезают. Данные занесите в табл. 26.

4. При заданных значениях U_0 и C определите зависимость периода T релаксационных колебаний от величины зарядного сопротивления R . Для этого выставьте величину R ($R > R_{\text{кр}}^{\text{изм}}$) на магазине сопротивлений и по горизонтальной шкале осциллографа измерьте время t_n , соответствующее n периодам ($n = 4-5$). Повторите эти же измерения еще для 4 других значений R . Данные занесите в табл. 26.

5. Определите периоды $T_{\text{изм}}$ колебаний ($T_{\text{изм}} = t_n/n$) при разных значениях R и постройте график зависимости $T_{\text{изм}} = f_2(R)$. Убедитесь в том, что полученная экспериментальная зависимость является линейной.

6. По формуле (66) рассчитайте период $T_{\text{расч}}$ релаксационных колебаний для тех же значений R и сравните их с $T_{\text{изм}}$.

7. По формуле (65) рассчитайте критическое сопротивление $R_{\text{кр}}$, используя данные U_3 , U_{Γ} , I_3 , I_{Γ} , полученные при выполнении задания 1. Сравните расчетное и измеренное значения $R_{\text{кр}}$.

РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Наркевич, И. И. Физика / И. И. Наркевич, Э. И. Волмянский, С. И. Лобко. – Минск: Новое знание, 2004.
2. Наркевич, И. И. Физика для ВТУЗов: в 2 т. / И. И. Наркевич, Э. И. Волмянский, С. И. Лобко. – Минск: Вышэйш. шк., 1992. – Т. 1; 1994. – Т. 2.
3. Детлаф, А. А. Курс физики: учеб. пособие для ВТУЗов / А. А. Детлаф [и др.]. – М.: Высш. шк., 1989, 2000.
4. Детлаф, А. А. Курс физики: в 3 т. / А. А. Детлаф [и др.]. – М.: Высш. шк., 1973. – 3 т.
5. Трофимова, Т. И. Курс физики / Т. И. Трофимова. – М.: Высш. шк., 1998.
6. Савельев, И. В. Курс общей физики: в 3 т. / И. В. Савельев. – М.: Наука, 1987. – 3 т.
7. Методические указания по наименованию, обозначению физических величин и единицам их измерения в СИ / сост. С. И. Лобко, Э. В. Ратников, И. М. Белый. – Минск: БГТУ, 1981.
8. Тейлор, Дж. Введение в теорию ошибок / Дж. Тейлор; пер. с англ. – М.: Мир, 1985.

СОДЕРЖАНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ	3
ЭЛЕКТРИЧЕСТВО	4
Лабораторная работа № 31. Измерение диэлектрической проницаемости твердых диэлектриков	4
Лабораторная работа № 32. Определение диэлектрической проницаемости жидких диэлектриков	7
Лабораторная работа № 33. Изучение поляризации сегнетоэлектриков	10
Лабораторная работа № 34. Измерение сопротивлений с помощью моста Уитстона	14
Лабораторная работа № 35. Изучение электропроводности водных растворов	18
Лабораторная работа № 36. Изучение законов Видемана – Франца	20
Лабораторная работа № 37. Изучение работы вакуумного диода и определение удельного заряда электрона	22
Лабораторная работа № 38. Определение работы выхода электрона из металла	26
Лабораторная работа № 39. Градуирование термопары	29
Лабораторная работа № 40. Изучение работы электронного осциллографа	31
МАГНЕТИЗМ	38
Лабораторная работа № 46. Определение удельного заряда электрона	38
Лабораторная работа № 47. Исследование кривой намагничивания ферромагнетика	44
Лабораторная работа № 48. Изучение магнитного гистерезиса с помощью осциллографа	48
Лабораторная работа № 49. Изучение явления электромагнитной индукции	52

Лабораторная работа № 50. Изучение свободных затухающих электромагнитных колебаний	57
Лабораторная работа № 51. Проверка закона Ома для цепи переменного тока	60
Лабораторная работа № 52. Исследование резонанса напряжений	64
Лабораторная работа № 53. Измерение емкости конденсаторов и индуктивности катушек мостовым методом	67
Лабораторная работа № 54. Изучение релаксационных электрических колебаний	75
РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА	83

Учебное издание

Мадьяров Владимир Рафкатович

Тульев Валентин Валентинович

Наркевич Иван Иванович

ФИЗИКА

Лабораторный практикум

В 3-х частях

Ч. 2. Электричество и магнетизм

Компьютерный набор и верстка

О.В. Хвалей

Редактор *Р.М. Рябая*

Подписано в печать 01.11.2007. Формат 60×84 1/16.
Бумага офсетная. Гарнитура Таймс. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 5,0. Уч.-изд. л. 5,1.

Тираж 900 экз. Заказ

Учреждение образования

«Белорусский государственный технологический университет».

220006. Минск, Свердлова, 13а.

ЛИ № 02330/0133255 от 30.04.2004.

Отпечатано в лаборатории полиграфии учреждения образования

«Белорусский государственный технологический университет».

220006. Минск, Свердлова, 13.

ЛП № 02330/0056739 от 22.01.2004.